



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y construcción de una impresora 3D

Autor

Luis Bueno Sáinz

Director

Juan Diego Jaria Gazol

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2020



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

**Diseño y construcción de una
impresora 3D**

428.18.87

Autor: Luis Bueno Sáinz

Director: Juan Diego Jaria Gazol

Fecha: 23/06/2020

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. RESUMEN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 2 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 3.1. FDM LA TECNOLOGÍA MÁS POPULAR | 3 |
| 3.2. OBJETIVO PRINCIPAL, CONFIABILIDAD | 3 |
| 3.3. IMPORTANCIA DE LA REDUCCIÓN DE COSTES | 3 |
| 3.4. CONSOLIDACIÓN DE LA TECNOLOGÍA | 4 |
| 4. ANTECEDENTES | 5 |
| 4.1. ORIGINAL PRUSA | 5 |
| 4.1.1. <i>Original Prusa I3 MK3S, I3 MMU2S</i> | 5 |
| 4.1.2. <i>Original Prusa MINI</i> | 7 |
| 4.2. CREALITY SERIE ENDER | 8 |
| 4.2.1. <i>Ender 2</i> | 8 |
| 4.2.2. <i>Ender 3 y Ender 3 Pro</i> | 9 |
| 4.2.3. <i>Ender 5, Ender 5 Pro y Ender 5 Plus</i> | 11 |
| 4.3. CREALITY SERIE CR | 13 |
| 4.3.1. <i>CR-10, CR-10 V2</i> | 13 |
| 4.4. TWO TREES SAPPHIRE-S | 14 |
| 4.5. ULTIMAKER S5 | 14 |
| 4.6. IMPRESORA CON BRAZO ROBÓTICO | 16 |
| 4.7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE ANTECEDENTES | 17 |
| 4.7.1. <i>A4988 y DRV8825</i> | 17 |
| 4.7.2. <i>LV8729</i> | 17 |
| 4.7.3. <i>Fabricante TMC</i> | 17 |
| 4.7.4. <i>Superficies de impresión fijas y desmontables</i> | 18 |
| 4.7.5. <i>Sistemas de adhesión</i> | 18 |
| 5. ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS Y COMPONENTES | 19 |
| 5.1. PROTOTIPADO RÁPIDO Y MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 19 |
| 5.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN | 19 |
| 5.2.1. <i>Fotopolimerización</i> | 19 |
| 5.2.2. <i>Sintetizado</i> | 20 |

| | | |
|------------|--|----|
| 5.2.3. | <i>Modelado por deposición fundida</i> | 21 |
| 5.3. | PROCESO DE IMPRESIÓN | 21 |
| 5.4. | TIPOLOGÍA DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 23 |
| 5.4.1. | <i>Cartesianas</i> | 24 |
| 5.4.2. | <i>Delta</i> | 25 |
| 5.4.3. | <i>Polar</i> | 25 |
| 5.5. | COMPONENTES DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 26 |
| 5.5.1. | <i>Extrusor</i> | 26 |
| 5.5.1.1. | Tipos de extrusores | 26 |
| 5.5.2. | <i>Fusor</i> | 27 |
| 5.5.3. | <i>Superficie de impresión</i> | 29 |
| 5.5.3.1. | Nivelación | 29 |
| 5.5.3.1.1. | Nivelación manual | 30 |
| 5.5.3.1.2. | Nivelación automática | 31 |
| 5.5.4. | <i>Cama caliente</i> | 32 |
| 5.5.5. | <i>Cuadro</i> | 33 |
| 5.5.6. | <i>Sistemas de accionamiento</i> | 33 |
| 5.5.6.1. | Actuadores | 33 |
| 5.5.6.1.1. | Motor paso a paso | 33 |
| 5.5.6.1.2. | Husillo | 35 |
| 5.5.6.1.3. | Poleas | 38 |
| 5.5.6.2. | Sistemas de guiado lineal | 39 |
| 5.5.6.2.1. | Varilla lisa | 39 |
| 5.5.6.2.2. | Patín | 40 |
| 5.5.6.2.3. | Extrusiones v-slot | 40 |
| 5.5.7. | <i>Placa base</i> | 41 |
| 5.5.7.1. | Controladores de motores | 41 |
| 5.5.7.1.1. | Modos de funcionamiento | 41 |
| 5.5.7.2. | Sensores de nivelación | 42 |
| 5.5.7.3. | Sensores térmicos | 42 |
| 5.5.7.1. | Firmware | 45 |
| 5.6. | LAMINADO EN SISTEMAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 45 |
| 5.6.1. | <i>Ajustes básicos</i> | 46 |
| 5.7. | MATERIALES DE IMPRESIÓN EN MÁQUINAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 48 |
| 5.7.1. | <i>PLA</i> | 48 |
| 5.7.2. | <i>ASA/ABS</i> | 49 |
| 5.7.3. | <i>PET/PETG</i> | 50 |
| 5.7.4. | <i>HIPS</i> | 51 |
| 5.7.5. | <i>Nailon</i> | 52 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 5.7.6. | TPE/TPU | 52 |
| 5.7.7. | PP | 53 |
| 6. | SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO | 54 |
| 6.1. | DESPLAZAMIENTO EN EJES | 54 |
| 6.1.1. | Ejes XY | 54 |
| 6.1.2. | Eje Z | 55 |
| 6.2. | ACCIONAMIENTO POR HUSILLO | 55 |
| 6.2.1. | Supuesto 1/16 | 55 |
| 6.2.2. | Supuesto 1/32 | 56 |
| 6.3. | ACCIONAMIENTO POR CORREAS | 56 |
| 6.3.1. | Supuesto 1/16 | 56 |
| 6.3.2. | Supuesto 1/32 | 56 |
| 6.4. | ACTUADORES | 57 |
| 6.4.1. | Motores | 57 |
| 7. | COMPONENTES ELECTRÓNICOS | 59 |
| 7.1. | CONTROLADORES | 59 |
| 7.2. | PLACA | 60 |
| 7.2.1. | Conexiones | 61 |
| 7.2.2. | Alimentación | 63 |
| 7.3. | CAMA CALIENTE (Y SUPERFICIE DE IMPRESIÓN) | 63 |
| 7.4. | SENSOR DE NIVELACIÓN | 64 |
| 7.5. | VENTILADORES | 65 |
| 8. | SISTEMA DE EXTRUSIÓN | 67 |
| 8.1. | FUSOR | 67 |
| 8.2. | EXTRUSOR | 67 |
| 9. | FABRICACIÓN DE PIEZAS | 69 |
| 9.1. | MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA | 70 |
| 9.1.1. | Soporte Eje X | 70 |
| 9.1.2. | Tensor Eje X | 70 |
| 9.1.3. | Carro | 71 |
| 9.1.4. | Soporte motor Eje X | 71 |
| 9.1.5. | Idler Eje Y | 72 |
| 9.1.6. | Tensor Eje Y | 72 |
| 9.2. | MECANIZADO | 73 |
| 9.2.1. | Esquina | 73 |

INDICES

| | | |
|------------|---|-----------|
| 9.2.2. | <i>Lateral</i> | 73 |
| 9.2.3. | <i>Soportes motores Eje Z</i> | 74 |
| 9.2.4. | <i>Soporte motor Eje Y</i> | 74 |
| 9.2.5. | <i>Carro XY</i> | 75 |
| 10. | CONSTRUCCIÓN DEL CUADRO | 76 |
| 11. | ENSAMBLAJE | 79 |
| 11.1. | EJE X | 79 |
| 11.2. | EJE Y | 80 |
| 11.3. | EJE Z | 80 |
| 11.4. | EXTRUSOR | 81 |
| 11.5. | CAMA CALIENTE Y SUPERFICIE DE IMPRESIÓN | 81 |
| 12. | FIRMWARE | 83 |
| 12.1. | DESCARGA | 83 |
| 12.2. | CONFIGURACIÓN MARLIN | 83 |
| 12.2.1. | <i>Configuration.h</i> | 83 |
| 12.2.2. | <i>Configuration_adv.h</i> | 83 |
| 12.3. | COMPILACIÓN | 84 |
| 12.4. | COMPROBACIÓN | 84 |
| 13. | CONCLUSIÓN | 85 |
| 14. | BIBLIOGRAFÍA | 86 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | | |
|----------------|--|---|
| Ilustración 1. | The State of 3D Printing, Sculpteo 2020..... | 3 |
| Ilustración 2. | The State of 3D Printing, Sculpteo 2020..... | 3 |
| Ilustración 3. | The State of 3D Printing, Sculpteo 2020..... | 4 |
| Ilustración 4. | The State of 3D Printing, Sculpteo 2020..... | 4 |
| Ilustración 5. | Original Prusa I3 MK3S | 5 |
| Ilustración 6. | Engranajes del fabricante Bondtech | 6 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 7. Resultado de la toma de datos sobre la superficie de impresión de una Original Prusa I3 MK3 | 6 |
| Ilustración 8. Original Prusa I3 MK3S con MMU2S | 7 |
| Ilustración 9. Módulo MMU2S | 7 |
| Ilustración 10. Original Prusa MINI..... | 7 |
| Ilustración 11. Creality Ender 2 | 8 |
| Ilustración 12. Rodamientos utilizados en impresoras del fabricante Creality. | 9 |
| <i>Ilustración 13. Sistema V-slot Wheel</i> | 9 |
| Ilustración 14. Placa base de Ender 2 | 9 |
| <i>Ilustración 15. Creality Ender 3</i> | 10 |
| <i>Ilustración 16. Creality Ender 3 Pro</i> | 10 |
| Ilustración 17. Creality Ender 5 | 11 |
| Ilustración 18. Creality Ender 5 Pro | 11 |
| Ilustración 19. Creality Ender 5 Plus..... | 12 |
| Ilustración 20. Creality CR-10 | 13 |
| Ilustración 21. Creality CR-10 V2..... | 13 |
| Ilustración 22. Two Trees SAPPHIRE-S | 14 |
| Ilustración 23. Guía lineal SAPPHIRE-S..... | 14 |
| Ilustración 24. Ultimaker S5..... | 15 |
| Ilustración 25. Cabezal Ultimaker S5..... | 15 |
| Ilustración 26. Diseño del chasis (a), chasis fabricado (b) y electrónica (c). | 16 |
| Ilustración 27. Vista general de la impresora con brazo robótico. | 16 |
| Ilustración 28. SLA-Laser. Esquema funcionamiento..... | 20 |
| Ilustración 29. DLP-SLA. Esquema funcionamiento..... | 20 |
| Ilustración 30. MSLA. Esquema de funcionamiento..... | 20 |
| Ilustración 31. Efecto escalera en modelado por deposición fundida. | 21 |
| Ilustración 32. Etapas del proceso de impresión. | 21 |
| Ilustración 33. Diferencias entre CAD y STL. | 22 |
| Ilustración 34. Laminado de un archivo STL. | 22 |

INDICES

| | |
|---|----|
| Ilustración 35. Tipologías de máquinas medidoras por coordenadas. | 24 |
| Ilustración 36. Esquema impresora 3D cartesiana..... | 25 |
| Ilustración 37. Esquema impresora 3D delta. | 25 |
| Ilustración 38. Comparación extrusión bowden y directa..... | 26 |
| Ilustración 39. Extrusor directo | 27 |
| Ilustración 40. Extrusor Bowden | 27 |
| Ilustración 41. Anatomía de un fusor..... | 28 |
| Ilustración 42. Diferentes zonas de un fusor..... | 29 |
| Ilustración 43. Filamento en la primera capa..... | 30 |
| Ilustración 44. Ajuste manual de la superficie de impresión. | 30 |
| Ilustración 45. Galga de espesor..... | 31 |
| Ilustración 46. Peine de espesor | 31 |
| Ilustración 47. Visualización de mesh bed leveling. | 32 |
| Ilustración 48. Ejemplo gráfica Torque-RPM | 34 |
| Ilustración 49. Distintas entradas de un husillo..... | 36 |
| Ilustración 50. Tuerca de acero con casquillo de bronce..... | 36 |
| Ilustración 51. Tuercas completas de bronce..... | 37 |
| Ilustración 52. Motor paso a paso con husillo ensamblado. | 37 |
| Ilustración 53. Acoplamiento flexible (izquierda) y motor y husillo acoplado (derecha) | 37 |
| Ilustración 54. Desalineaciones sobre los ejes. | 38 |
| Ilustración 55. Relaciones geométricas de polea y correa dentada. | 39 |
| Ilustración 56. Rodamiento plano con carcasa | 39 |
| Ilustración 57. Rodamiento con carcasa dentada | 39 |
| Ilustración 58. Varilla lisa | 40 |
| Ilustración 59. Despiece v-slot Wheel: rodamiento (1), cubierta (2) y arandela (3) | 40 |
| Ilustración 60. Perfil v-slot 2020..... | 41 |
| Ilustración 61. Sensor inductivo NPN..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 62. Curva característica genérica | 43 |
| Ilustración 63. Curva característica PT100 | 43 |
| Ilustración 64. Modo de conexión PT100 con 2 hilos. | 44 |
| Ilustración 65. Modo de conexión PT100 con 3 hilos. | 44 |
| Ilustración 66. Modo de conexión PT100 con 4 hilos. | 44 |
| Ilustración 67. Captura de PrusaSlicer 2.2.0..... | 46 |
| Ilustración 68. Patrones de relleno y como afecta la densidad al resultado | 47 |
| Ilustración 69. Rodamiento lineal eje X (izq.), rodamiento lineal eje Y (dcha.) .. | 55 |
| Ilustración 70. Curva par-velocidad NEMA17 | 58 |
| Ilustración 71. SKR 1.4 Diagrama modo UART..... | 61 |
| Ilustración 72. SKR 1.4 Vista general[70] | 61 |
| Ilustración 73. SKR 1.4 Diagrama de conexiones | 62 |
| Ilustración 74. SKR Placa base, diagrama de cableado[71] | 63 |
| Ilustración 75. Cama caliente de silicona | 64 |
| Ilustración 76. Superficie de impresión flexible (BuildTak)..... | 64 |
| Ilustración 77. Sensor PINDA 2 | 65 |
| Ilustración 78. Ventilador Hotend, Noctua NF-A4x10 FLX | 65 |
| Ilustración 79. LDO Radial cooling fan | 66 |
| Ilustración 80. Fusor All Metal V6 de E3D..... | 67 |
| Ilustración 81. Extrusor BMG de Bondtech | 68 |
| Ilustración 82. Sistema de extrusión completo, vista de corte. | 68 |
| Ilustración 83. Vista previa de la superficie de impresión. | 69 |
| Ilustración 84. Información del laminado. | 70 |
| Ilustración 85. Diseño soporte Eje X..... | 70 |
| Ilustración 86. Diseño tensor Eje X. | 71 |
| Ilustración 87. Carro Eje X. | 71 |
| Ilustración 88. Diseño soporte motor Eje X. | 72 |
| Ilustración 89. Diseño extremo Eje Y..... | 72 |



| | |
|--|----|
| Ilustración 90. Diseño tensor Eje Y. | 73 |
| Ilustración 91. Diseño pletina esquina. | 73 |
| Ilustración 92. Diseño pletina lateral T. | 74 |
| Ilustración 93. Diseño soporte motor Eje Z (derecho)..... | 74 |
| Ilustración 94. Diseño soporte motor Eje Z (izquierdo). | 74 |
| Ilustración 95. Diseño soporte motor Eje Y. | 75 |
| Ilustración 96. Diseño Carro XY. | 75 |
| Ilustración 97. Diseño cuadro (Inventor) | 76 |
| Ilustración 98. Extrusiones de aluminio 2040 | 77 |
| Ilustración 99. Tuercas de inserción | 77 |
| Ilustración 100. Ejemplo de unión..... | 78 |
| Ilustración 101. Ejemplo unión angular. | 78 |
| Ilustración 102. Conjunto Eje X. | 79 |
| Ilustración 103. Tensor de la correa Eje X..... | 80 |
| Ilustración 104. Conjunto Eje Y | 80 |
| Ilustración 105. Conjunto Eje Z | 81 |
| Ilustración 106. Conjunto Extrusor y Fusor. | 81 |
| Ilustración 107. Conjunto Cama caliente y superficie de impresión..... | 82 |
| Ilustración 108. Ensamblaje completo de la máquina. | 82 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Controladores de Trinamic con la tecnología StallGuard | 59 |
| Tabla 2. Comparación de placas comerciales | 60 |

1. RESUMEN

La impresión 3D está evolucionando continuamente y hoy en día es una solución de prototipado rápido muy versátil, sin embargo, la percepción que tiene la industria sobre la impresión 3D está cambiando y vemos como ha empezado a consolidarse como un proceso de fabricación. Es clave por lo tanto el desarrollo de máquinas y materiales capaces de producir piezas con alta precisión de manera consistente y con los mismos resultados.

En este proyecto se hace un estudio de las diferentes tecnologías de impresión con especial atención al modelado por deposición fundida así como los componentes empleados en este tipo máquinas. A partir de este estudio y junto con el análisis de antecedentes se propone una diseño de impresora 3D basado en el proyecto RepRap. También se detalla el proceso de diseño y se cubre tanto la fabricación de piezas como la elección de componentes comerciales.

Para terminar, se adapta el firmware OpenSource Marlin a las características de la máquina y por último se proponen una serie de acciones y comprobaciones a realizar sobre la máquina antes de su puesta en marcha.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una máquina de prototipado rápido evaluando las diferentes tecnologías para lograr unas prestaciones equivalentes a máquinas comerciales. Para ello será necesario hacer un análisis de antecedentes y un estudio de tecnologías y componentes que dará lugar a un diseño de una máquina de prototipado rápido de modelado por deposición fundida (MDF) la cual pueda ser usada para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala.

El objetivo secundario es el desarrollo personal de competencias específicas en el área de impresión 3D tanto en el apartado teórico, como de diseño y en el de fabricación.

Como objetivos específicos, la impresora tendrá las siguientes características:

- Programación del firmware OpenSource de la máquina
- Superficie de impresión de al menos 220 x 220 mm.
- Sistema de nivelación automático de la superficie de impresión la cual posea un sistema de adhesión de piezas.
- Lograr velocidades cercanas al estándar (200 mm/s) sin comprometer la calidad de la impresión de piezas
- Diseño robusto capaz de soportar altas fuerzas dinámicas provocadas por dichas velocidades de impresión. Fundamental para mantener buenas tolerancias de piezas impresas.
- Minimizar el uso de lo que dentro del proyecto RepRap se conoce como vitaminas, todo tipo de piezas obtenidas a partir de un proceso de fabricación diferente a la impresión 3D. Por lo que en la parte de diseño se tratará de priorizar este tipo de soluciones frente a piezas comerciales.

3. INTRODUCCIÓN

Cada año, el servicio de impresión 3D Sculpteo [1] publica un informe anual llamado The State of 3D Printing [2], en esta edición participaron 1600 personas de las cuales el 62% tiene formación en ingeniería. De la edición de este año se pueden sacar las siguientes resultados:

3.1. FDM LA TECNOLOGÍA MÁS POPULAR

La tecnología de deposición de material fundido FDM es el proceso más utilizado seguido de SLS (Sinterización selectiva por láser) y SLA (Estereolitografía).

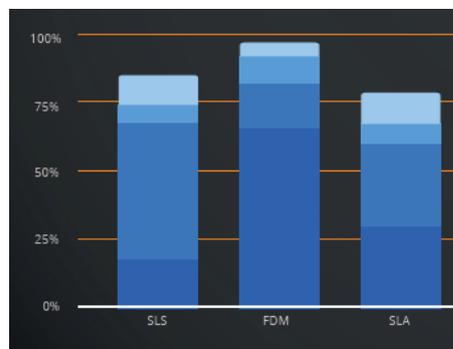


Ilustración 1. The State of 3D Printing, Sculpteo 2020.

3.2. OBJETIVO PRINCIPAL, CONFIABILIDAD

EL 51% de los encuestados afirman que el control de calidad de las piezas es su prioridad número uno y un 62% consideran que la industria tiene que evolucionar y mejorar su tecnología para lograr unas piezas fiables.

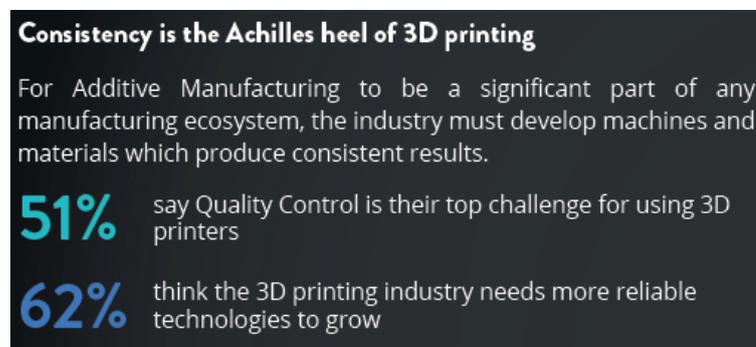


Ilustración 2. The State of 3D Printing, Sculpteo 2020.

3.3. IMPORTANCIA DE LA REDUCCIÓN DE COSTES

La mitad de los usuarios externalizan en la fabricación de piezas a terceros para reducir costes y casi el 60% considera que la inversión para acceder a este tipo de tecnologías es fuerte y el precio de entrada prohibitivo.

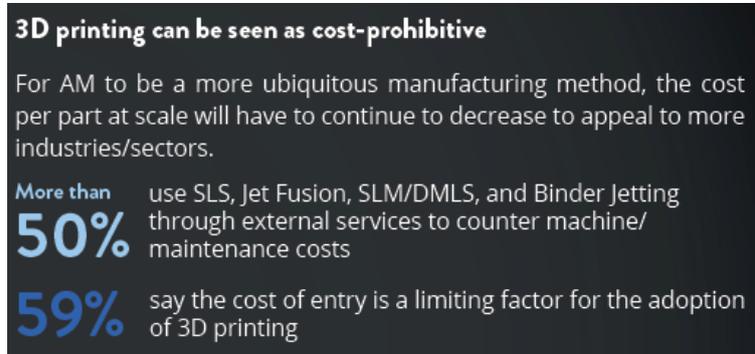


Ilustración 3. The State of 3D Printing, Sculpteo 2020.

3.4. CONSOLIDACIÓN DE LA TECNOLOGÍA

La especialización en el área está aumentando con el 80% de los usuarios habiendo trabajado más de dos años con esta tecnología.

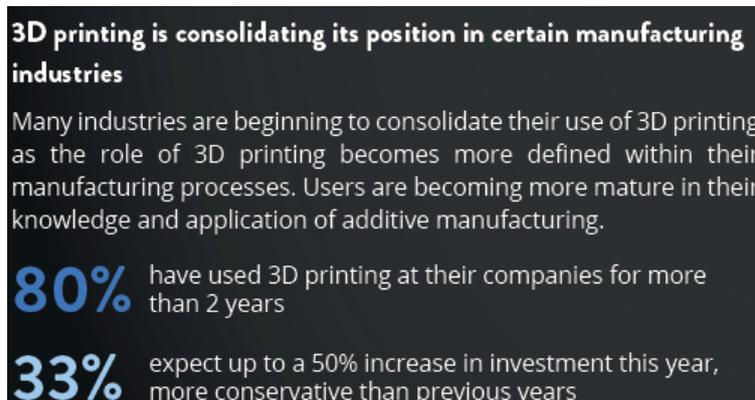


Ilustración 4. The State of 3D Printing, Sculpteo 2020.

4. ANTECEDENTES

Los antecedentes que se proponen son analizados atendiendo a tecnología de modelado, volumen de impresión, resolución, velocidad de impresión, tipología, tipo de extrusor, desplazamiento de partes móviles, electrónica de control con intención de compararlas y de encontrar el estado del arte en lo que a tecnología se refiere.

Cualquier otro elemento singular y diferenciador también será expuesto y analizado.

4.1. ORIGINAL PRUSA

4.1.1. *Original Prusa I3 MK3S, I3 MMU2S*



Ilustración 5. Original Prusa I3 MK3S

La impresora Original Prusa I3 MK3S[3] se trata de la tercera revisión de la tercera iteración[2] de la impresora Original Prusa de Josef Prusa y Prusa Research[5].

De tecnología de modelado por deposición fundida tienen un volumen de impresión de 250 x 210 x 200 mm lo cual supone un volumen grande con relación a las dimensiones de la impresora 550x400x500 mm. La resolución es de 0,05 mm y la velocidad máxima de impresión es de 200 mm/s.

La geometría de la impresora es de tipo pórtico, la estructura está fabricada mediante extrusiones de aluminio y láminas de aluminio.

Utiliza un extrusor directo mediante los engranajes del fabricante *Bondtech* [6], Ilustración 6. Engranajes del fabricante Bondtech, en la ilustración se pueden ver los dos engranajes que lo forman. Estos son capaces de apretar el filamento por ambos lados incrementando y homogeneizando la fuerza aplicada sobre el mismo.



Ilustración 6. Engranajes del fabricante Bondtech

El desplazamiento de las partes móviles se produce mediante varillas lisas y correas en los ejes X e Y y mediante también varillas lisas y husillos en el Z. Utiliza rodamientos lineales de bolas sobre las varillas.

La electrónica se encuentra recogida en un lateral de la máquina. La paca de control es EINSY RAMBo[7] basada en Atmega2560[8] la cual integra los *drivers* TMC2130[9]. Dichos *drivers* son los responsables de la detección y recuperación de capas desplazadas (pérdida de pasos) y de la detección de pérdida de energía. Los motores que emplea son NEMA 17.

Otras características que destacar son la inclusión un sensor mecánico de filamento, una cama caliente magnética y flexible la cual se puede retirar, nivelación automática con el sensor P.I.N.D.A. 2. Este sensor hace una toma de datos sobre la superficie de impresión en forma de malla.

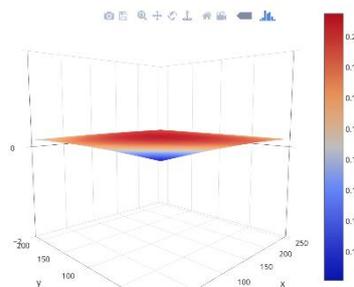


Ilustración 7. Resultado de la toma de datos sobre la superficie de impresión de una Original Prusa I3 MK3

Mide la distancia entre el extrusor y la superficie de impresión para más adelante a través del software realizar correcciones.



Ilustración 8. Original Prusa I3 MK3S con MMU2S

El fabricante ofrece la posibilidad de actualizar la impresora con el módulo MMU2S[10] el cual es un kit de instalación. Dicho kit ofrece la posibilidad de imprimir hasta con 5 filamentos al mismo tiempo.



Ilustración 9. Módulo MMU2S

En Ilustración 9. Módulo MMU2S se aprecia mecanismo de carga de accionamiento directo con un solo tubo de PTFE que lleva el filamento al extrusor.

4.1.2. Original Prusa MINI



Ilustración 10. Original Prusa MINI

Impresora Original Prusa MINI[11] de Original Prusa de Josef Prusa y Prusa Research dispone de un volumen de impresión de 150 x 150 x 200 mm. Emplea varillas lisas con correas GT como Original Prusa I3 MK3S (4.1.1).

Para el eje Z emplea un husillo con el motor colocado en la parte superior.

El extrusor es de tipo *Bowden*[12]. Este tipo de extrusores reciben el nombre debido a que usan un cable de teflón para alimentar el filamento al extrusor. Del inglés *Bowden cable*.

4.2. CREALITY SERIE ENDER

4.2.1. Ender 2

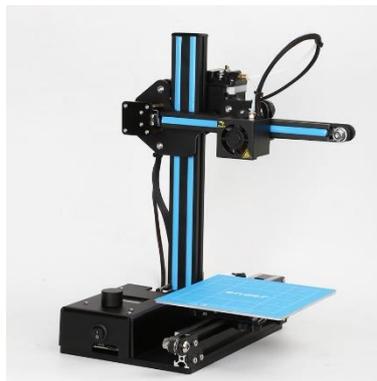


Ilustración 11. Creality Ender 2

La impresora Ender 2 del fabricante *Creality* es una impresora de modelado por deposición fundida. El volumen de impresión es reducido 150 x 150 x 200 y su resolución de impresión y velocidad máxima son 0,1 mm y 100 mm/s.

La geometría de esta impresora es poco común en el mercado. Similar a Original Prusa MINI (4.1.2). Todos los ejes se desplazan a lo largo de una única barra como se puede ver en Ilustración 11. Creality Ender 2.

El extrusor es de tipo *Bowden*, el fusor se encuentra en la barra del eje X y el motor de este está colocado en la barra del eje Z.

Estás barras son extrusiones de aluminio sobre las cuales se produce el desplazamiento de las partes móviles mediante el uso de rodamientos cubiertos por una polea de plástico como se puede ver en Ilustración 12. Rodamientos utilizados en impresoras del fabricante Creality.



Ilustración 12. Rodamientos utilizados en impresoras del fabricante Creality.

Con el uso de dichos rodamientos y mediante correas dentadas se producen los desplazamientos a lo largo de las extrusiones de aluminio en ejes X, Y y Z.



Ilustración 13. Sistema V-slot Wheel

La electrónica se encuentra en la caja adyacente, la placa de control está basada en el microcontrolador de 8 bits ATmega1284P.



Ilustración 14. Placa base de Ender 2

La nivelación de la superficie de impresión se realiza de forma manual a través unos tornillos colocados en la parte inferior de la misma.

4.2.2. Ender 3 y Ender 3 Pro



Ilustración 15. Creality Ender 3



Ilustración 16. Creality Ender 3 Pro

Cómo se puede ver tanto en Ilustración 15. Creality Ender 3 como en Ilustración 16. Creality Ender 3 Pro la geometría de estas impresoras difiere de la del modelo Ender 2 anteriormente analizado.

Estas impresoras tienen una estructura de tipo pórtico en la que el eje Z se desplaza a lo largo de dos extrusiones de aluminio. Este tipo de geometría es más común dado que requiere menos material y el montaje es más sencillo. En cuanto a los ejes X e Y no hay diferencias con respecto al modelo Ender 2. Disponen del mismo tipo de extrusor.

4.2.3. Ender 5, Ender 5 Pro y Ender 5 Plus

Las impresoras de la serie Ender 5 de Creality tiene una estructura de tipo cubo.

CREALITY

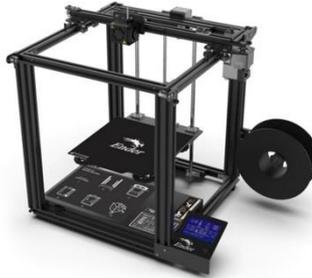


Ilustración 17. Creality Ender 5

El eje X e Y se desplaza de la misma manera que la impresora Ender 2 (4.2.1) sobre la extrusión de aluminio. Como novedad en esta serie la cama caliente se desplaza de desde la parte superior hacia abajo de manera que el extrusor solo se mueve a lo largo del eje X e Y siendo la cama la que se desplaza sobre el eje Z. Esta característica es común a todas las impresoras de estructura cúbica. El conjunto extrusor se aprovecha de la propia estructura utilizando las extrusiones de aluminio como guías para desplazarse en el plano horizontal.

CREALITY



Ilustración 18. Creality Ender 5 Pro

En los modelos Ender 5 y Ender 5 Pro la cama se desplaza sobre dos varillas lisas accionada por un único husillo.



Ilustración 19. Creality Ender 5 Plus

En el modelo Ender 5 Plus don 4 varillas lisas las sobre las que se mueve la cama caliente accionada mediante dos motores con husillo.

Toda la serie usa un extrusor tipo *Bowden*, aun habiendo una superficie de impresión magnética retirable la nivelación de la misma se hace de manera manual igual que en Ender 2 (4.2.1) y Ender 3 y Ender 3 Pro (4.2.2).

4.3. CREALITY SERIE CR

4.3.1. CR-10, CR-10 V2

CREALITY



Ilustración 20. Creality CR-10

Como se puede ver en Ilustración 21. Creality CR-10 V2. El modelo CR-10 V2 se añaden dos barras laterales para aumentar la rigidez de la impresora mejorando la calidad de impresión reduciendo los artefactos.

CREALITY



Ilustración 21. Creality CR-10 V2

Dichas barras van atornilladas a la parte frontal y la impresora en el eje Y y a la superior en el eje Z formando una estructura triangular.

4.4. TWO TREES SAPPHIRE-S

Impresora con estructura cúbica de tipo CORE XY.

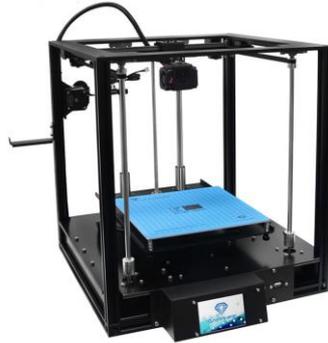


Ilustración 22. Two Trees SAPPHIRE-S

La cualidad diferenciadora de esta impresora con respecto a las vistas hasta ahora es que en el eje X utiliza una guía lineal. El extrusor se acopla al patín el cual se desliza por la guía gracias a una correa de tipo GT como se puede ver en Ilustración 23. Guía lineal SAPPHIRE-S. Esto produce un aumento en la calidad de la impresión de acuerdo con el fabricante ya que estas guías lineales son más rígidas que las varillas lineales.

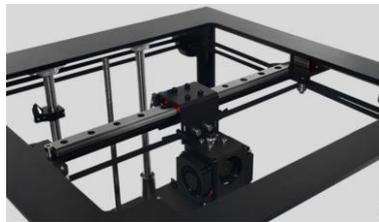


Ilustración 23. Guía lineal SAPPHIRE-S

En la parte de control utiliza una plaza de 32 bits con el procesador Coretx-m4. Los controladores de los motores o *drivers* empleados son LV8729 del fabricante FYSETC.

4.5. ULTIMAKER S5

Es la primera impresora profesional analizada en este proyecto, hasta ahora todas las analizadas anteriormente se catalogaban en la categoría de "escritorio".



Ilustración 24. Ultimaker S5

Ultimaker S5 [13] un volumen de impresión de 330 x 240 x 300 mm. La geometría de la impresora es similar a las de la serie Ender 5 (0) pero con una estructura cerrada. La estructura cerrada proporciona un control de temperatura y flujo de aire constante evitando cambios bruscos de temperatura que pueden afectar al resultado de la pieza.

El desplazamiento en el eje X e Y los realiza a través de dos varillas lisas como se puede ver en Ilustración 25. Cabezal Ultimaker S5. El movimiento en el eje Z a través de 2 varillas lisas accionadas por un husillo.



Ilustración 25. Cabezal Ultimaker S5

Dispone de un cabezal de impresión formado dos extrusores tipo Bowden. Estos dos extrusores ofrecen flexibilidad a la hora de imprimir piezas complejas. Existe la posibilidad de imprimir piezas con soportes en un material soluble de manera que al terminar la impresión y sumergir la pieza en agua los soportes desaparecen.

La superficie de impresión se puede separar y es intercambiable entre cristal y aluminio para adaptarse a diferentes materiales.

Dispone de nivelación automática de la superficie de impresión y un sensor de filamento.

4.6. IMPRESORA CON BRAZO ROBÓTICO

En la conferencia FAIM2018 se presentó un prototipo de impresora FDM formada por un brazo robótico[14]. A dicho brazo robótico se le acopla un chasis en el que se monta la electrónica, el sistema de extrusión y el extrusor.

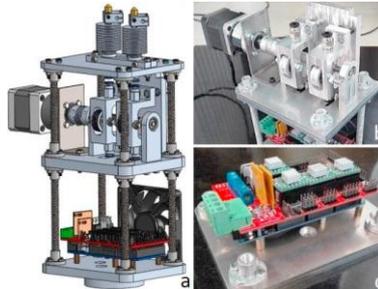


Ilustración 26. Diseño del chasis (a), chasis fabricado (b) y electrónica (c).

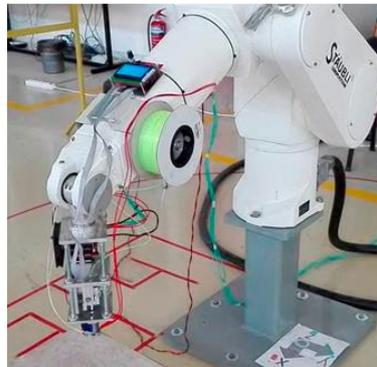


Ilustración 27. Vista general de la impresora con brazo robótico.

En este proyecto realizaron unas impresiones test las cuales compararon dimensionalmente con el diseño CAD. El error medio de las cuatro piezas analizadas fue 0,78%, 2,04% y 3,9% para las dimensiones de largo, ancho y alto. Este error está muy por encima de los errores que manejan impresoras convencionales analizadas anteriormente.

4.7. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Durante la revisión de antecedentes han aparecido diferentes controladores para los motores. A continuación se hace una revisión de estos:

4.7.1. *A4988 y DRV8825*

- A4988: del fabricante Allegro [15] han sido durante muchos años, junto con los DRV8825, los controladores más extendidos en la impresión 3D. Su principal atractivo es su bajo coste. Tienen una resolución de 1/16 micro pasos y funcionan en electrónica de 8 bits, lo cual también ha sido otro motivo de su popularidad ya que hasta hace relativamente poco las placas de 8 bits han sido el estándar del sector.
- DRV8825: del fabricante Texas Instrument [16] igual que los A4988 son unos controladores muy atractivos por su bajo coste, estos son más eficientes térmicamente lo cual evita en ocasiones la pérdida de pasos. Mejoran la resolución de los A4988 ya que estos permiten 1/32 micro pasos, también empleados en placas de 8 bits.

4.7.2. *LV8729*

Estos controladores han sido los más comunes en placas de 32 bits hasta la popularización de los controladores de Trinamic Motion Control que veremos más adelante. LV8729 en placas de 32bits permite usar una resolución de 1/128 micro pasos.

4.7.3. *Fabricante TMC*

Trinamic Motion Control en los últimos años ha patentado una serie de tecnologías creadas para la aplicación en impresoras 3D:

- StallGuard: mide la carga del motor en tiempo real, si el ángulo de carga aumenta y está a punto de producirse un salto el motor se para para evitar la pérdida de paso. Esta tecnología se puede aplicar para referenciar la máquina sin usar finales de carrera. Otra aplicación es el ajuste en tiempo real de la corriente necesaria para el funcionamiento del motor, en vez de funcionar siempre a la misma corriente, esta varía según las carga.

- SpreadCycle y StealthChop: son dos modos de funcionamiento, el primero adecuado para velocidades altas o cargas grandes y el segundo, un modo silencioso que reduce el ruido a velocidades bajas.

Otro elemento que analizar son las diferentes soluciones que los fabricantes por ponen como sistema de adhesión de las piezas y superficie de impresión.

4.7.4. Superficies de impresión fijas y desmontables

Se ha podido ver como fabricantes como Creality o Ultimaker ofrecen una superficie de impresión que se considera fija, es decir, que no puede ser manualmente desmontable para extraer las piezas, por el contrario Prusa tiene una solución basada en imanes de neodimio en la que una lámina de acero se coloca sobre los mismos de manera que cuando la impresión ha terminado se puede retirar la lámina para recuperar las piezas.

4.7.5. Sistemas de adhesión

Para mejorar la adhesión de la pieza durante la impresión se han visto diferentes soluciones, desde materiales como el vidrio borosilicato solución simple y económica hasta más avanzados sistemas como láminas flexibles con anclajes magnéticos. También se ha visto que la base calefactable o cama caliente es un estándar en máquinas actuales.

5. ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS Y COMPONENTES

5.1. PROTOTIPADO RÁPIDO Y MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Se considera prototipado rápido[17] a cualquier tecnología capaz de crear un modelo físico y tangible a partir de un diseño CAD. Una impresora 3D permite al diseñador crear prototipos de sus diseños rápidamente. Además de prototipos estas tecnologías pueden utilizarse para crear herramientas e incluso piezas de una calidad similar a una línea de producción convencional.

El prototipado rápido suele ser el mejor proceso de fabricación para pequeños lotes de producción y objetos con geometrías complejas. El término "rápido" es relativo ya que la fabricación de los modelos en función del tamaño y la complejidad del objeto puede durar desde 24 a 72 horas.

5.2. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN

Existen diferentes tecnologías de prototipado cada una con características diferenciadoras, ventajas y desventajas. A continuación se hace una descripción de las tecnologías más extendidas.

5.2.1. Fotopolimerización

Sistema de impresión 3D que emplea el principio de fotopolimerización para crear modelos. Este principio es uno de los más antiguos empleado en el prototipado rápido. Consiste en el endurecimiento selectivo capa a capa de un fotopolímero líquido en una cubeta. Existen tres procesos que usan esta tecnología: SLA (*Stereolithography*) o Estereolitografía, DLP (*Digital Light Processing*) o Procesamiento Digital por luz y MSLA (*Masked Stereolithography*) o Estereolitografía por Máscara.

La estereolitografía es un proceso de impresión en el que un haz de luz ultravioleta se focaliza sobre la superficie de una cuba llena de líquido fotopolimérico. Los rayos de luz dibujan un patrón en la superficie del líquido capa a capa.

Una vez endurecida la primera capa, la plataforma de elevación desciende la distancia equivalente al grosor de una capa de resina solidificada y se barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta lista para la

siguiente impresión láser ultravioleta. Repitiendo este proceso de va creando, capa a capa, la pieza tridimensional.

Los materiales empleados son generalmente resinas plásticas curables por UV.

Ofrece una alta precisión y resolución con acabados superficiales muy buenos. Gracias a esta alta resolución este sistema permite imprimir piezas de gran complejidad geométrica.

Por naturaleza los fotopolímeros son frágiles, aun así, son lo suficientemente duros como para ser mecanizados.

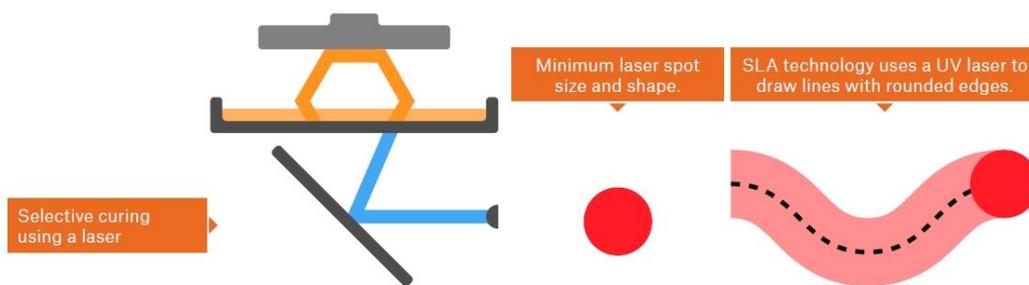


Ilustración 28. SLA-Laser. Esquema funcionamiento.

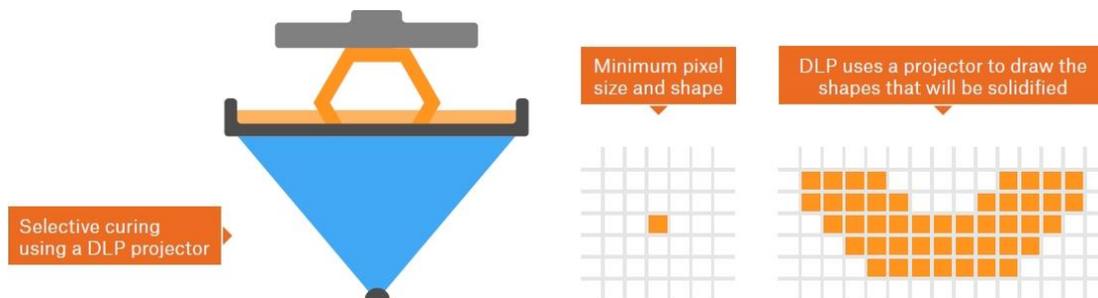


Ilustración 29. DLP-SLA. Esquema funcionamiento.

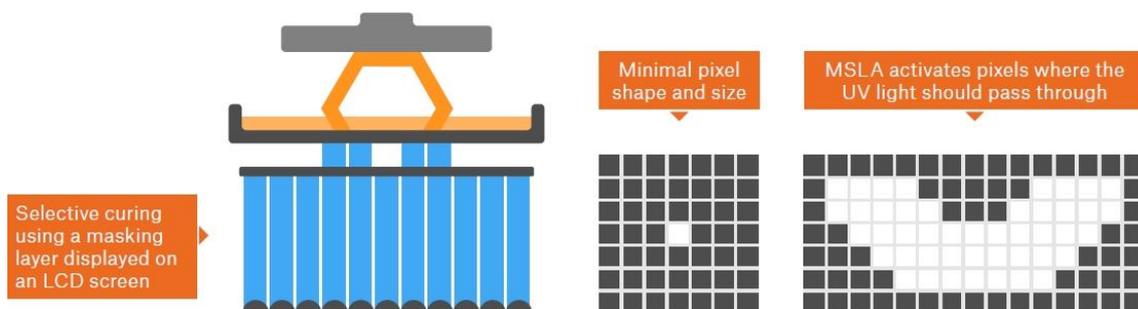


Ilustración 30. MSLA. Esquema de funcionamiento.

5.2.2. Sintetizado

Otros tipos de tecnologías de impresión 3D son *Selective Laser Sintering* (SLS) y *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) [18], que usan un proceso denominado sinterizado.

En esencia, cada vez que se imprime una capa, un cilindro esparce una fina capa de un polvo fino sobre la plataforma, que es a continuación sinterizado por la acción de un láser para que tome la forma deseada. Cuando la impresión finaliza, la pieza entera está cubierta de polvo. Debido a cómo funciona este método, las piezas deben tener agujeros por los cuales pueda salir el polvo sobrante. El polvo no sinterizado se puede reciclar para nuevas impresiones, lo que significa que poco material se desperdicia. Otra ventaja es que las capas son prácticamente invisibles.

5.2.3. Modelado por deposición fundida

En la tecnología de modelado por deposición fundida el filamento formado por un termoplástico es extruido por una boquilla la cual se mueve, generalmente, en el plano X-Y. Este filamento es depositado en una superficie plana y lisa sobre la cual el extrusor va depositando capas del material [19].

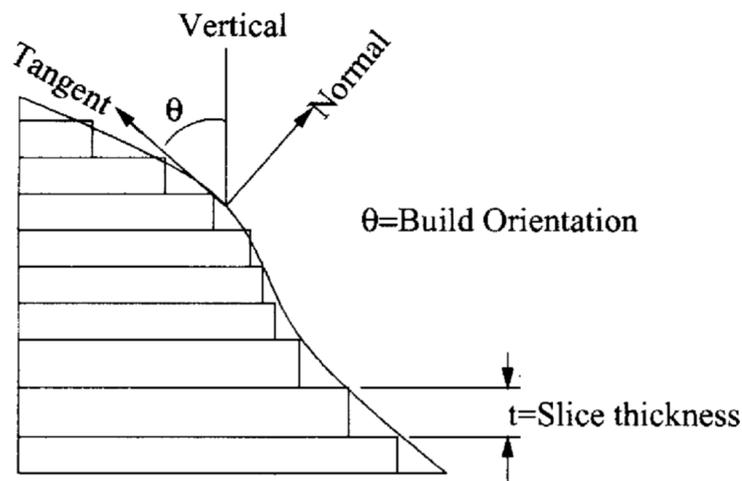


Ilustración 31. Efecto escalera en modelado por deposición fundida.

5.3. PROCESO DE IMPRESIÓN

Aun habiendo diferentes tecnologías de impresión, todas emplean un proceso similar en el cual se diferencian los siguientes pasos o etapas:

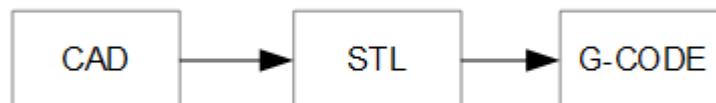


Ilustración 32. Etapas del proceso de impresión.

- Creación del diseño CAD (Computer-Aided Design): a través de software de diseño asistido por ordenador se diseña la pieza obteniendo un sólido.
- Conversión a formato STL [20], [21] (Standard Tessellation Language): cada software CAD usa algoritmos diferentes para representar el objeto sólido. Con la intención de unificar y simplificar el proceso se opta por emplear un formato común llamado STL. Este formato de archivo excluye información como color, texturas y propiedades físicas las cuales no son necesarias en la impresión 3D. Como resultado de este proceso se obtiene un archivo STL de la misma pieza esta vez formada por triángulos como aproximación al objeto CAD.

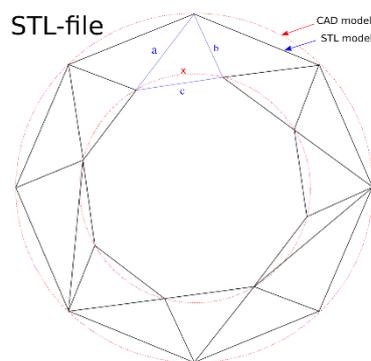


Ilustración 33. Diferencias entre CAD y STL.

El formato STL es el más extendido pero otros son igualmente válidos como por ejemplo: OBJ[22], AMF[23] y 3MF[24]

- Laminado del archivo STL: en este proceso se prepara el archivo STL para ser fabricado. Se ajusta el tamaño y la disposición y orientación del objeto sobre la superficie de impresión. Este software ejecuta un proceso sobre el objeto STL denominado laminado el cual crea capas de un grosor determinado según proceda. Este programa también es capaz de crear estructura auxiliar para soportar el objeto durante la impresión.

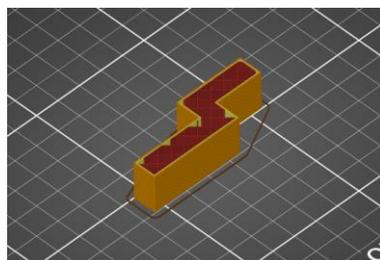


Ilustración 34. Laminado de un archivo STL.

En este proceso de laminado para, un sistema de impresión de modelado por deposición fundida, se puede configurar parámetros tales como:

- Capas y perímetros

- Relleno
- Falda y balsa
- Material de soporte
- Velocidad
- Filamento
- Enfriamiento
- Fabricación capa a capa: una vez laminado la pieza se obtiene un archivo G-code [25]. Este G-code es un lenguaje de programación usado en control numérico.

5.4. TIPOLOGÍA DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Un estudio acerca de la tipología de las máquinas medidoras por coordenadas [26] indica como la arquitectura de una máquina medidora por coordenadas cambia dependiendo de varios parámetros entre los que se encuentran las direcciones de desplazamiento de sus componentes, cómo se realizan estos y su volumen de medición.

La norma UNE-EN ISO 10360-1 hace una clasificación de la tipología más habitual de máquinas medidoras por coordenadas (Ilustración 35. Tipologías de máquinas medidoras por coordenadas.).

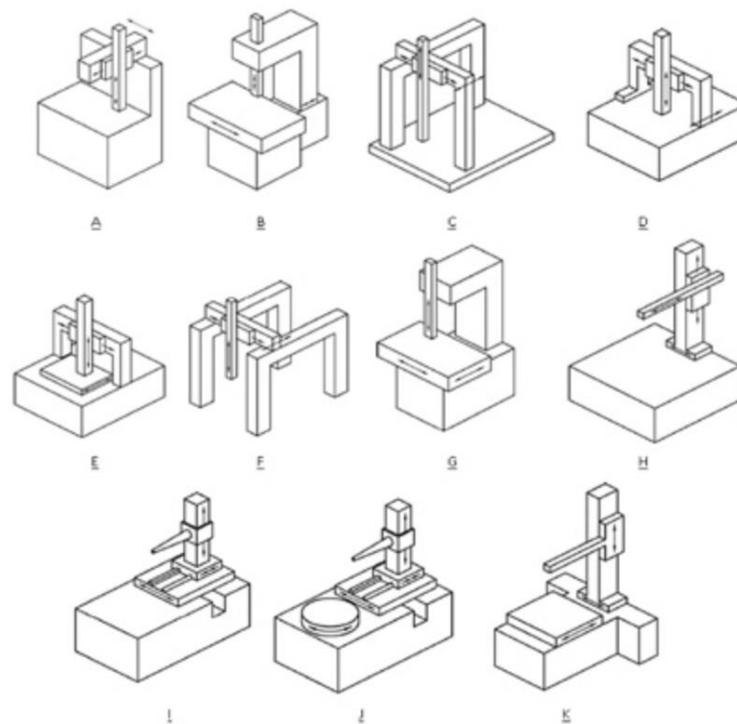


Ilustración 35. Tipologías de máquinas medidoras por coordenadas.

De la misma manera que la norma UNE-EN ISO 10360-1 clasifica la tipología de las máquinas medidoras por coordenadas se puede hacer una clasificación de la tipología de las impresoras 3D según el desplazamiento de los ejes.

Se puede dividir las impresoras 3D de modelado por deposición fundida en las siguientes categorías:

5.4.1. Cartesianas

Se denominan así por el sistema de coordenadas XYZ. El movimiento del extrusor se realiza en los dos ejes (X y Z) mientras que la base se mueve a lo largo del eje Y. También significa que la base de impresión es cuadrada o rectangular.

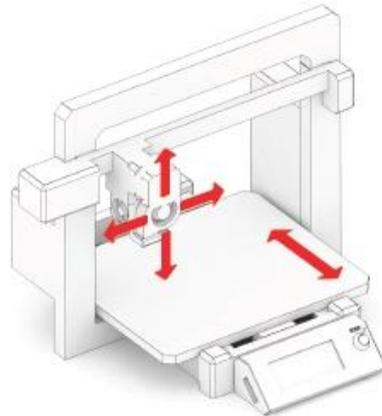


Ilustración 36. Esquema impresora 3D cartesiana.

5.4.2. Delta

Son impresoras en las que el movimiento del extrusor se realiza controlado por tres brazos móviles que se unen en el extrusor. Dos de sus principales ventajas son la velocidad de impresión y poder imprimir grandes volúmenes. Sin embargo, la impresora requiere un montaje y calibración extremadamente precisos. La geometría de la impresora requiere cálculos complejos para el movimiento de los motores de cada uno de los brazos.

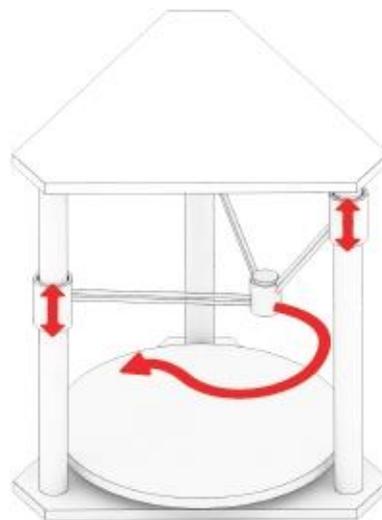


Ilustración 37. Esquema impresora 3D delta.

5.4.3. Polar

Se basan en un sistema de coordenadas polar. El extrusor se mueve en dos ejes y la base de impresión es giratoria. Este sistema es sencillo de construir, sin embargo, la preparación del modelo es bastante complicada.

5.5. COMPONENTES DE LAS IMPRESORAS 3D DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Todas las impresoras son bastante similares en su construcción. Normalmente constan de las siguientes piezas:

5.5.1. Extrusor

El extrusor es el elemento de la impresora encargado de alimentar el filamento al fusor.

5.5.1.1. Tipos de extrusores

Dentro de los extrusores existen dos tipos en función del accionamiento, como se ha visto en los antecedentes, existen dos tipos: Directo (4.1.1) y *Bowden* (4.1.2).

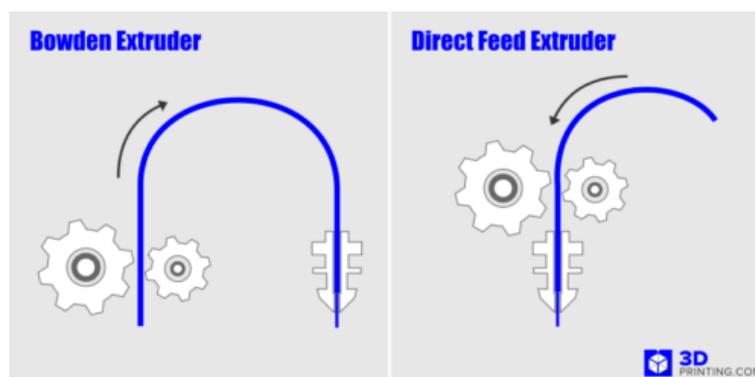


Ilustración 38. Comparación extrusión bowden y directa.

En el extrusor directo el filamento transcurre directamente desde la rueda dentada del extrusor al *HotEnd*. En ciertos extrusores como los del fabricante Bondtech [6] son dos las ruedas dentadas. En el extrusor *bowden* las ruedas dentadas accionan el filamento hacia el extrusor de manera remota a través de un tubo alimentador.

El extrusor directo presenta inercias considerablemente altas en el eje por el que se mueve. Este factor es determinante cuando se quieren realizar impresiones a altas velocidades al tener que desplazar el peso del conjunto extrusor formado por extrusor, motor de extrusor y *HotEnd*. En impresoras cerradas el motor puede presentar problemas de temperatura afectando al rendimiento de funcionamiento de este.

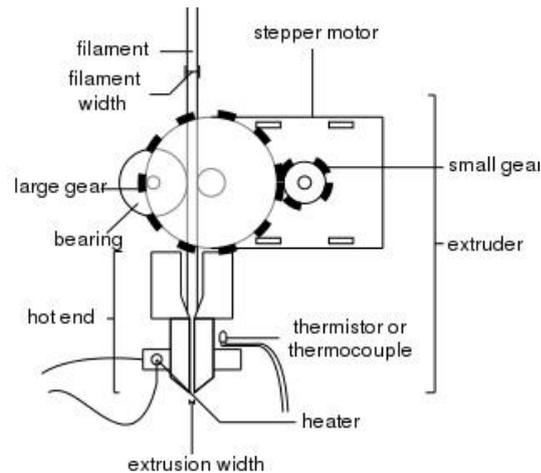


Ilustración 39. Extrusor directo

Por otro lado, este tipo de extrusor permite imprimir materiales flexibles de manera fiable. Necesita longitudes de retracción cortas reduciendo la posibilidad de provocar un atasco. La longitud de retracción es un movimiento de retroceso del filamento que se aplica durante los movimientos y desplazamientos que realiza el extrusor en vacío, es decir, cuando no está extruyendo.

El extrusor *Bowden* a diferencia del directo no presenta problemas de temperatura en impresoras cerradas ya que el motor está instalado fuera del cerramiento. Problemas derivados de las inercias en el eje de desplazamiento desaparecen permitiendo realizar impresiones muy rápidas y de alta calidad.

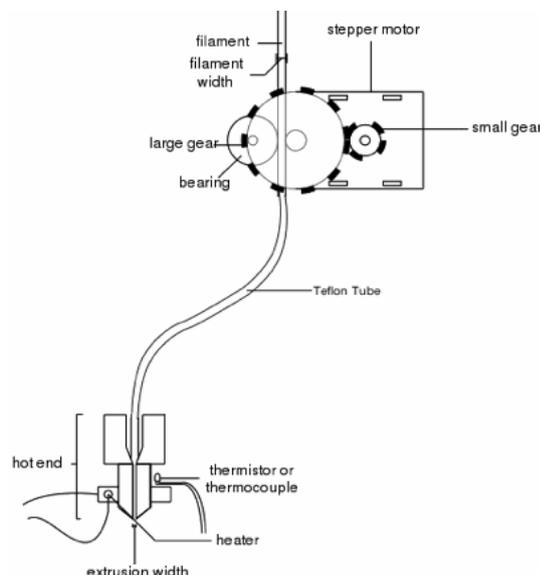


Ilustración 40. Extrusor Bowden

5.5.2. Fusor

Es el componente de la impresora donde se funde el material y de expulsa para depositarlo. Tal y como indica BCN3D[27] en su publicación *The anatomy of an Extrusion System*[28] la partes más comunes de la anatomía de un fusor son:

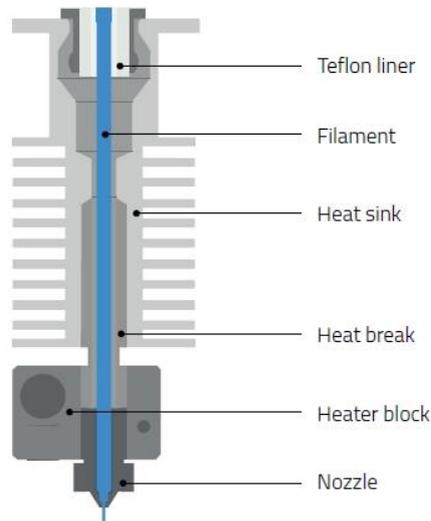


Ilustración 41. Anatomía de un fusor

- *Teflon liner* es un revestimiento de teflón utilizado para alinear y facilitar la entrada del filamento al fusor.
- *Heat sink* es el disipador de calor para evitar que la temperatura suba y el filamento comience a fundir antes de llegar al final del fusor.
- *Heat break* es un elemento que une el *heat sink* con el *heater block*.
- *Heater block*: es una pieza que aloja los siguientes componentes
 - *Heater Cartridge*: elemento que aporta calor de manera precisa y localizada.
 - *Thermistor*
- *Nozzle* o boquilla: es un elemento que controla la dirección y las características, en este caso de diámetro, del filamento fundido.

Dentro de un fusor se deben distinguir tres zonas:

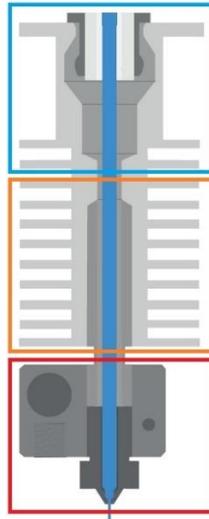


Ilustración 42. Diferentes zonas de un fusor

La primera zona es la zona (color azul) de entrada donde el material tiene que estar frío para evitar fricciones. La temperatura del material tiene que encontrarse por debajo de su temperatura de Transición vítrea o *Glass transition* (T_g) si la temperatura fuera superior el material comenzaría a expandirse. La segunda zona (color naranja) es considerada de transición donde la temperatura supera la T_g pero no alcanza la temperatura de fusión o *Melting Temperature* (T_m). Por último, encontramos la tercera zona (color rojo) considerada la zona de fusión donde la temperatura ha de ser lo más homogénea posible.

5.5.3. Superficie de impresión

Se trata de la superficie donde se deposita el filamento fundido que sale del fusor. Para evitar cambios bruscos de temperatura y mejorar la adhesión de la pieza esta superficie puede calefactada de ahí la denominación de "cama caliente". Esta superficie puede disponer de varios acabados para favorecer la adhesión, así como la posterior retirada de esta.

5.5.3.1. Nivelación

Una buena calibración o nivelación de la superficie de impresión es crucial para obtener una buena adhesión de la primera capa y por ende una buena impresión. El objetivo de esta nivelación es lograr una correcta adhesión. Para ello la boquilla tendrá que estar a la misma altura en cada punto de la superficie de impresión.

Si la boquilla está muy cerca de la superficie, la primera capa será chafada y probablemente dañada por arrastre. Si la boquilla está muy lejos de la superficie, no habrá suficiente adherencia y se desprenderá. Para diferentes tamaños de la boquilla y

diferentes alturas de capa es necesario una distancia boquilla-superficie de impresión diferente. Esta distancia puede moverse entre 0,1 y 0,3 para una boquilla de 0,4 mm.

El ajuste final se suele hacer llevar a cabo realizando una prueba y observando los resultados.

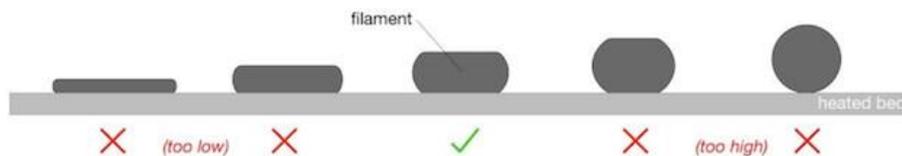


Ilustración 43. Filamento en la primera capa.

En máquinas analizadas en los antecedentes podemos ver dos tipos de nivelación, manual y automática [29].

5.5.3.1.1. Nivelación manual

Este tipo de nivelación se lleva a cabo en las cuatro esquinas. Se lleva la boquilla a una de las esquinas y se mide la distancia entre ella y la superficie de impresión.



Ilustración 44. Ajuste manual de la superficie de impresión.

El ajuste se lleva a cabo mediante unos tornillos y el procedimiento se repite para las cuatro esquinas.

Para la realización de este ajuste se emplean herramientas consideradas calibres fijos[30]. Este tipo de calibres o galgas son elementos mecanizados empleados para la verificación de cotas con tolerancias estrechas. Uno de los calibres fijos que pueden emplearse son las galgas de espesor que se utiliza para medir el tamaño de separaciones pequeñas entre dos objetos que están muy cerca.



Ilustración 45. Galga de espesor

La herramienta tiene una serie de tiras de metal plegables (también conocidas como cuchillas u hojas) que están mecanizadas con los niveles de espesor especificados. Suelen estar fabricadas de acero de herramienta templado o acero inoxidable y deben ser resistentes al óxido.

La segunda galga que podría emplearse es un peine de espesor como el de la Ilustración 46. Peine de espesor, de similar funcionamiento a la galga anteriormente mencionada.

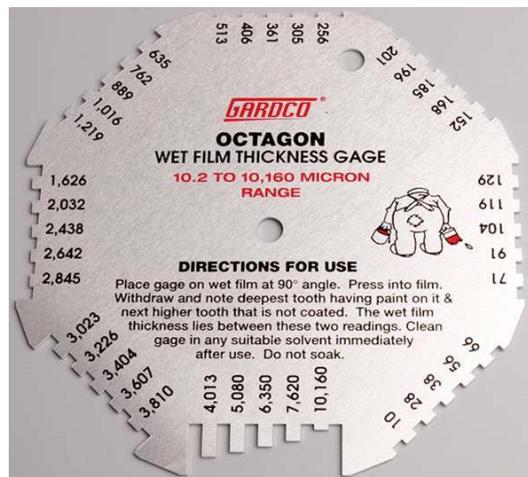


Ilustración 46. Peine de espesor

5.5.3.1.2. Nivelación automática

Este tipo de nivelación de lleva a cabo mediante un sensor. Dicho sensor puede ser mecánico, inductivo, capacitivo u óptico. Antes de realizar la calibración de la superficie de impresión hay que conocer la distancia relativa entre el sensor y la boquilla.

Hay diferentes tipos de nivelaciones automáticas:

- Three-point: hace una medición en tres puntos arbitrarios y obtiene una matriz de la inclinación de la superficie de impresión.

- Planar Grid: hace mediciones en una cuadrícula y obtiene la misma matriz que la nivelación anterior.
- Bilinear Grid: hace mediciones en una cuadrícula y aplica una compensación con interpolaciones.
- Unified bed leveling (UBL) [31]: proyecta una malla sobre la superficie de impresión. La altura Z se mide en cada punto de dicha cuadrícula. Para cada segmento de la cuadrícula se calcula Z al inicio y al final y se compensa mediante interpolación lineal. Para cualquier punto dentro de una cuadrícula la compensación se produce calculando la interpolación bilineal de las alturas Z de las cuatro esquinas.
- Mesh bed leveling: proyecta una malla similar al método UBL y realiza una compensación por interpolaciones.

Automatizar la nivelación de aporta las siguientes ventajas frente a la calibración manual:

- Se suprime el error humano propio del manejo de la herramienta.
- Permite tomar múltiples mediciones, rápidamente a lo largo de la superficie dado que esta puede mostrar irregularidades y no ser perfectamente plana. En ese caso habría que rectificar mediante software, cosa que no es posible con la calibración manual.

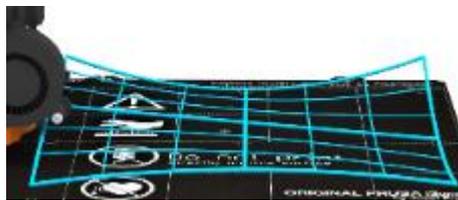


Ilustración 47. Visualización de mesh bed leveling.

- El límite de desviación para hacer la compensación es de 0,05 mm.

5.5.4. Cama caliente

También se le conoce con el término inglés Heatbed, es una pieza de un grosor la cual dispone de un circuito eléctrico en su interior el cual genera el calor suficiente para que la superficie de impresión se mantenga a la temperatura deseada. Para controlar la fluctuación de temperatura se utiliza un termistor.

El funcionamiento es a través del calentamiento de un conductor por el paso de la corriente a través de él. Existen principalmente dos tipos de camas salientes como hemos podido comprobar en los antecedentes: camas de silicona y camas PCB.

- Camas de silicona: son superficies de silicona flexible, en su interior tienen una resistencia de hilo de micrón. La unión de la silicona con la superficie de impresión se hace mediante un adhesivo.
- Camas PCB: de baquelita su funcionamiento es el mismo que la cama de silicona pero la unión con la superficie de impresión no se hace con adhesivo. Distintos fabricantes han resuelto este problema utilizando pinzas o imanes.

Se ha hecho una distinción entre cama caliente y superficie de impresión lo cual es en términos generales, dos productos diferentes. Existen en el mercado soluciones en las que superficie de impresión y cama caliente son un solo producto.

5.5.5. *Cuadro*

El cuadro es la estructura que sujeta la impresora. Un cuadro rígido y fabricado con precisión que tiene un impacto favorable en la calidad de impresión. Un cuadro robusto y firme minimiza las vibraciones y permite una impresión más rápida sin problemas de calidad en las piezas impresas.

Según la tipología de la máquina el cuadro tendrá unas características u otras como se ha analizado en 5.45.4

5.5.6. *Sistemas de accionamiento*

Como hemos visto en los antecedentes hay una gran variedad de sistemas de accionamiento en las impresoras actuales, en lo que a actuadores se refiere los motores paso a paso son el estándar. Sin embargo, hay variedad de sistemas guía como por ejemplo varillas lisas, patines y v-slot.

5.5.6.1. *Actuadores*

5.5.6.1.1. *Motor paso a paso*

El motor paso a paso [39] es el convertidor electromecánico que permite la conversión de una información en forma de energía eléctrica, en una energía mecánica y una información de posición. Está constituido por un estator cuyos devanados se llaman fases y un rotor de un elevado número de polos. Su funcionamiento es síncrono y la alimentación cíclica de sus fases debe originar en cambio de configuración un giro elemental del rotor, constante, llamado paso.

Como se ha visto en los antecedentes el tipo de motor utilizado en la inmensa mayoría de las impresoras es el motor paso a paso. Son varias las características [32] que hacen que el motor paso a paso sea la opción más utilizada:

- La precisión de estos motores hace que se puedan utilizar en aplicaciones sin retroalimentación, es decir, no necesitan *feedback* para funcionar correctamente.
- Estos tipos de motores producen un par muy alto a bajas velocidades angulares.

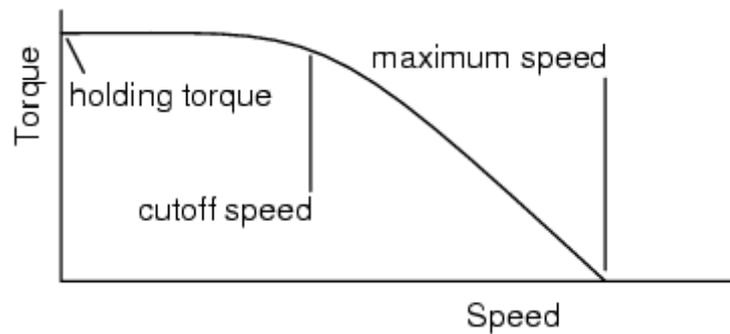


Ilustración 48. Ejemplo gráfica Torque-RPM

Se puede ver en la gráfica anterior como disminuye el par con el aumento de la velocidad angular, esto ocurre en todos los motores paso a paso.

- Estos motores son capaces de quedarse fijos manteniendo un par constante simplemente aplicando corriente en las bobinas.
- El control de velocidad y de aceleración es simple lo que permite controlar inercia y frenada para movimientos suaves y fluidos.

El principio de funcionamiento de un motor paso a paso [33] es la conversión de una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control.

El par de un motor es:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

Siendo: τ par, I inercia y α aceleración radial.

El par se divide en dos, τ_{ace} par de aceleración y τ_{carga} par de carga. También se añade un coeficiente de seguridad sf .

$$\tau = (\tau_{ace} + \tau_{carga}) \cdot sf$$

El par de aceleración es:

$$\tau_{ace} = (I_{carga} + I_0 \cdot i^2) \cdot \alpha$$

Siendo:

I_{carga} inercia de la carga

$$I_{carga} = m \cdot r^2$$

I_0 inercia del rotor

i ratio

α aceleración radial

El par de carga es:

$$\tau_{carga} = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot r}{\eta \cdot i}$$

Siendo: μ fricción, m masa, g fuerza de la gravedad, r radio de la polea y η rendimiento.

La inercia del motor I_0 es un valor específico de cada motor y ronda entre los valores de 57 y 120.

Para calcular el ratio i utilizamos los valores de la polea conductora y de la conducida.

El cálculo de α es una conversión de la aceleración lineal del sistema a aceleración radial.

$$\alpha = \frac{a \cdot \text{paso} \cdot \pi}{n^\circ \text{ dientes}}$$

La precisión de la máquina está estrechamente relacionada con la precisión de los motores. Si un motor tiene un ángulo de paso de 1,8 grados. $360/1,8=200$ el motor tiene 200 pasos por vuelta sin contar el *microstepping* [34]

El motor paso a paso en condiciones normales, sin contar el *microstepping*, permite un total de 200 posiciones en 360. El *microstepping* permite dividir estos pasos en pasos adicionales o micro pasos. Desde dividir un paso en dos hasta 1/128 según el controlador.

Con un controlador 1/128 cada uno de los 200 pasos individuales se han dividido en 128 por lo que el motor puede detenerse en $200 \cdot 128 = 25600$ posiciones en una revolución.

5.5.6.1.2. Husillo

Es muy común en impresoras 3D que el eje Z utilice husillos de rosca trapecial [35] para su avance.

Un husillo [36] es un tipo de tornillo largo utilizado para producir un desplazamiento lineal o accionar un elemento de apriete. Este tornillo largo al girar produce el desplazamiento longitudinal de la tuerca que lleva enroscada.

Las características principales del husillo son las siguientes:

- Número de entradas, z , o filetes de rosca característica, es el número de hélices que se enroscan en paralelo sobre el núcleo del tornillo.

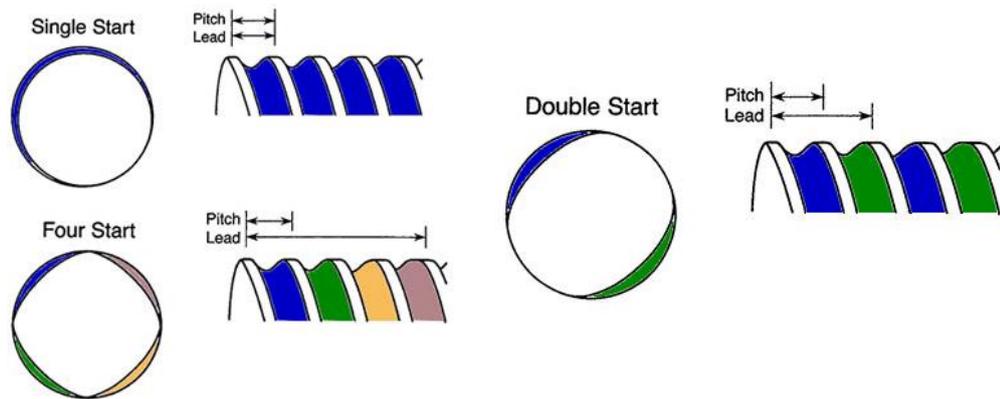


Ilustración 49. Distintas entradas de un husillo

- El paso de rosca, p , es la distancia entre dos filetes consecutivos de una misma hélice. Se mide en milímetros (mm). El paso de rosca es igual a la longitud que avanza el husillo en cada vuelta.
- El avance, A , es la distancia que avanza la tuerca al girar el husillo una vuelta completa. La relación entre avance, número de entradas y paso de rosca es: $A = z \cdot p$.
- La longitud desplazada, L , es la distancia que se desplaza la tuerca cuando el husillo gira n vueltas completas. $L = A \cdot n = z \cdot p \cdot n$.

Hay dos tipos de tuercas, de acero con casquillo de bronce insertado o una tuerca completa de bronce. Ambas tuercas disponen de taladros de anclaje no roscado para tornillos métricos.

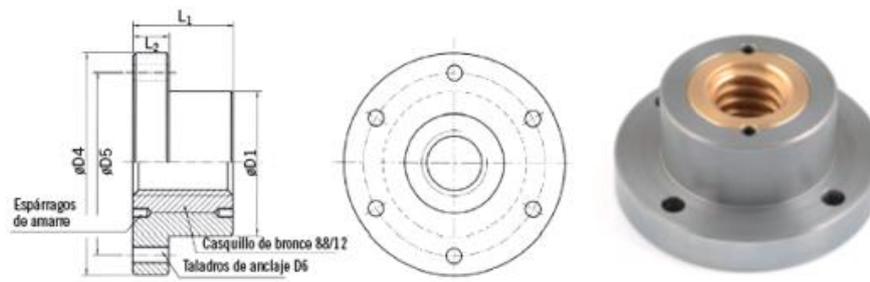


Ilustración 50. Tuerca de acero con casquillo de bronce.

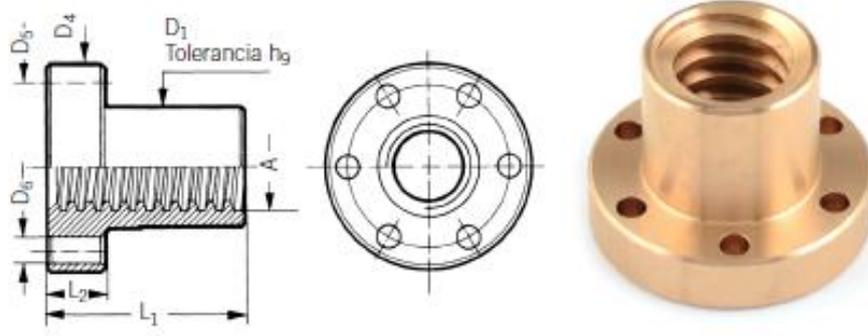


Ilustración 51. Tuercas completas de bronce.

Estos husillos pueden estar ensamblados directamente en el montaje del motor como se puede ver a continuación:



Ilustración 52. Motor paso a paso con husillo ensamblado.

O bien pueden estar acoplados al eje del motor mediante un acoplamiento flexible, este acoplamiento une los extremos del husillo con los del eje del motor. Dentro de los acoplamientos flexibles el más empleado según lo estudiado en antecedentes es el acoplamiento de tipo muelle:



Ilustración 53. Acoplamiento flexible (izquierda) y motor y husillo acoplado (derecha)

Estos acoplamientos son capaces de transmitir el movimiento del motor al eje permitiendo cierta desalineación [37] axial, angular y radial. Dichas desalineaciones son inherentes a todo montaje mecánico.

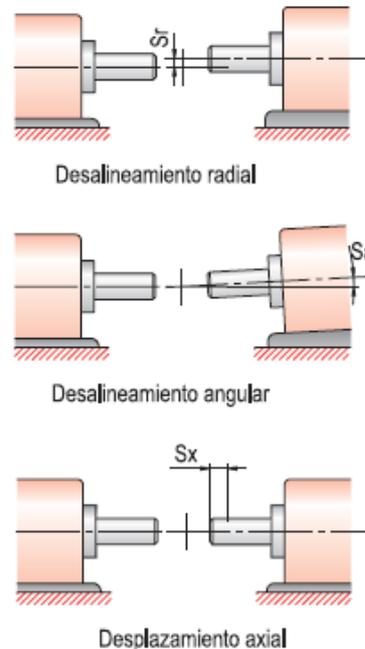


Ilustración 54. Desalineaciones sobre los ejes.

Estos acoplamientos son fabricados en aluminio de una sola pieza y no producen variaciones de la velocidad en la transmisión. Pueden soportar pares de 2-150Ncm y velocidades de 8000 r.p.m.

5.5.6.1.3. Poleas

La gran mayoría de los antecedentes analizados emplean correas y poleas dentadas para transmitir el movimiento en ejes X e Y. En una polea se distinguen varios elementos, el primero es el paso que se define como la distancia entre los centros de dos dientes contiguos. También se definen dos diámetros, el interior y el exterior.

Las relaciones geométricas [38] entre la polea y la correa son:

Diámetro de la polea:

$$d = \frac{p \cdot Z_p}{\pi}$$

Donde p es el paso, Z_p el número de dientes.

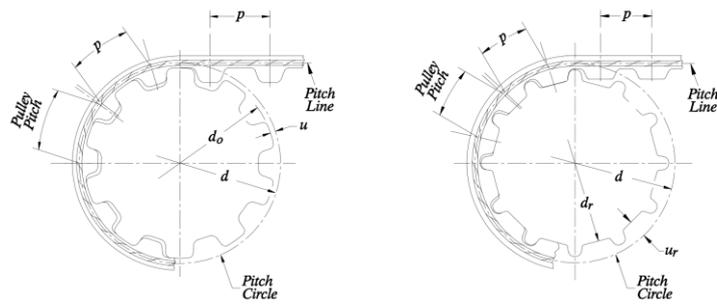


Ilustración 55. Relaciones geométricas de polea y correa dentada.

En el lado opuesto a la polea se utiliza un rodamiento plano con carcasa para centrar la correa. En la siguiente imagen se puede ver el tipo de rodamiento empleado.



Ilustración 56. Rodamiento plano con carcasa

También es posible pero menos común utilizar un rodamiento en el que la carcasa tiene las mismas características de paso y número de dientes que la polea.



Ilustración 57. Rodamiento con carcasa dentada

5.5.6.2. Sistemas de guiado lineal

Como sistemas de guiado existen:

5.5.6.2.1. Varilla lisa

Acompañando a los actuadores anteriormente mencionados uno de los sistemas de guiado lineal más utilizados es la varilla lisa. Dichas varillas tienen que ir acompañadas de rodamientos lineales, normalmente de recirculación de bolas, aunque también se pueden emplear otros como bronce o poliméricos



Ilustración 58. Varilla lisa

5.5.6.2.2. Patín

Con la misma idea de funcionamiento que las varillas lisas se pueden emplear rieles lineales.

5.5.6.2.3. Extrusiones v-slot

OpenBuilds[39] creó en 2013 las extrusiones v-slot a gracias a una campaña en Kickstarter[40]. Desde entonces se han convertido en referente de sistemas de fabricación modular con extrusiones de aluminio para máquinas de prototipado rápido

Estas guías son perfiles de aluminio extruido las cuales tiene un carril lineal de ranura en forma de V. Esta guía se emplea como sistema de guiado lineal mediante el uso de ruedas específicamente diseñadas que se deslizan sobre el mismo.

Las ruedas están formadas por

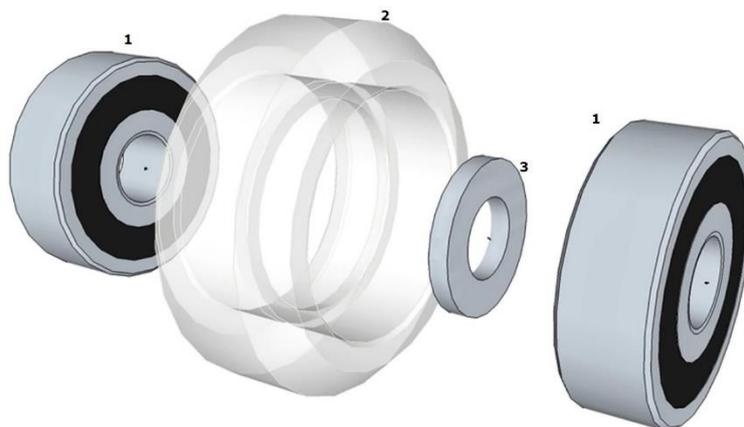


Ilustración 59. Despiece v-slot Wheel: rodamiento (1), cubierta (2) y arandela (3)

Las cubiertas pueden estar fabricadas en materiales como policarbonato, poliacetal o acero al carbono según las necesidades de la aplicación en fuerza y peso a la que será sometida la rueda.

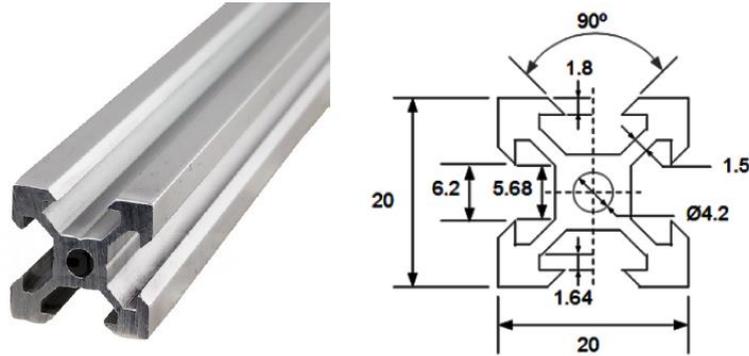


Ilustración 60. Perfil v-slot 2020

5.5.7. Placa base

La placa base es el componente electrónico que controla toda la impresora. Su principal función es leer los archivos de instrucciones (G-code) y controlar los motores, base calefactable y fusor según las instrucciones que se encuentran dentro del G-code.

5.5.7.1. Controladores de motores

Para controlar los motores paso a paso existen unos controladores especialmente diseñado para esta tarea.

5.5.7.1.1. Modos de funcionamiento

Podemos encontrar tres modos de funcionamiento en controladores Step/Dir, SPI y UART:

- STEP/DIR: o Step/Direction es el modo de funcionamiento básico y más simple de los controladores. Se envían los pasos y dirección al motor y este ejecuta los comandos pertinentes. Este modo de funcionamiento no permite ningún tipo de información sea devuelta al controlador, información que puede ser útil como corriente aplicada, posición real o posibles errores.
- SPI: o Serial peripheral interface es un avanzado. Requiere una configuración de pines diferente al modo STEP/DIR debido a que la información que no se podía obtener en el modo básico sí que se puede obtener ahora.
- UART: UART o Universal Asynchronous Receiver-Transmitter es un dispositivo que controla las comunicaciones serie, al igual que los controladores que funcionan por SPI, recibe información en tiempo real.

Todos los controladores pueden funcionar en el modo básico STEP/DIR y los más avanzados funcionan siempre en modo básico y en uno de los dos avanzados o incluso tienen la opción de funcionar en ambos.

El uso de los modos SPI o UART en controladores avanzados permite hacer mediciones de carga de los motores constante sin ningún tipo de sensor adicional, estas mediciones permiten detectar las paradas del motor y eliminar finales de carrera ya que cuando el controlador detecta un obstáculo, detiene el motor. También es posible optimizar el consumo eléctrico de los motores reduciendo el voltaje de estos ajustándose a la carga. Como consecuencia, la temperatura del motor se reduce. También permiten regular la modulación del voltaje para minimizar la fluctuación de corriente y reducir la magnetostricción evitando ruidos o zumbidos en tonos altos.

5.5.7.2. *Sensores de nivelación*

Como se ha mencionado en 5.5.3.1.2 la nivelación automática se realiza de diferentes formas mediante un sensor ya sea mecánico o electrónico. En los antecedentes analizados es común encontrar sensores inductivos NPN.



Ilustración 61. Sensor inductivo NPN.

El funcionamiento de estos sensores sobre superficies de impresión es sencillo, pues estos tipos de sensores detectan metales a distancias cortas sin contacto físico.

Los sensores inductivos contienen un oscilador transistorizado cuyo consumo de corriente es afectado por la proximidad de metales a la bobina del mencionado oscilador. Esta bobina se encuentra alojada en la cabeza del sensor y el circuito oscilador se aloja en el cuerpo, es por lo que este tipo de sensores tienen forma cilíndrica. La variación de intensidad es detectada por el circuito electrónico del sensor y mediante un amplificador se convierte en señal.

5.5.7.3. *Sensores térmicos*

Es habitual el uso de termorresistencias en máquinas de modelado por deposición fundida. En los antecedentes aparecen este tipo de sensores en fusores, camas calientes y, en casos muy concretos en sensores de nivelación y motores de extrusores.

Este tipo de sondas miden la temperatura a través de una resistencia formada por un RTD (detector de temperatura por resistencia) de platino, cuyos valores de medición

están definidos por una serie de normas. Si la temperatura cambia, la resistencia eléctrica en el sensor aumenta o disminuye siguiendo una curva característica definida por la norma.

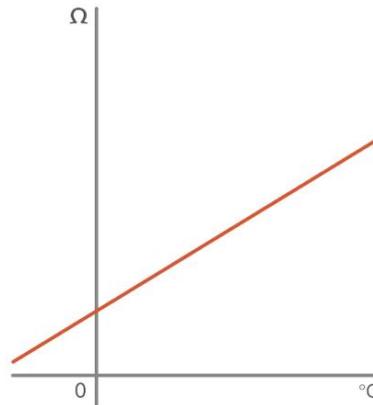


Ilustración 62. Curva característica genérica

Al medir la resistencia la temperatura se puede determinar con exactitud. La precisión de estas sondas está definida por las diferentes clases. Generalmente al aumentar la exactitud se reduce el rango aplicable.

Dentro de la familia de sensores RTD hay dos tipos de núcleos, el estratificado y el bobinado. La norma IEC 60751[41] define los rangos de temperatura (-196°C a 600°C) así como las curvas características.

Si las termorresistencias exceden o caen por debajo del rango de medición para el cual fueron diseñadas los valores medidos comienzan a desviarse de la exactitud definida en el estándar. El resultado de la medición ya no es exacto.

La versión estándar del sensor RTD para aplicaciones industriales es el sensor PT100[39] el cual tiene una resistencia eléctrica de 100Ω a 0°C

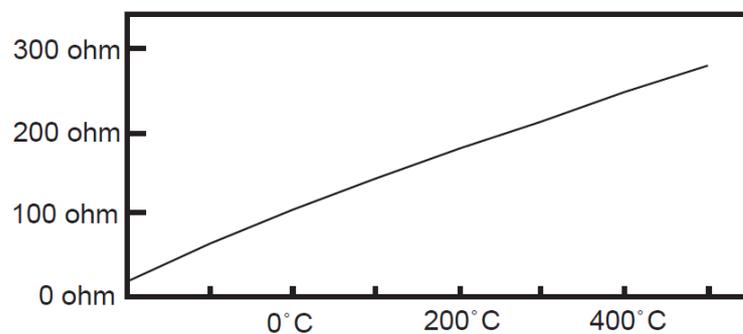


Ilustración 63. Curva característica PT100

Existen diferentes modos de conexión para las PT100:

- Con 2 hilos



Ilustración 64. Modo de conexión PT100 con 2 hilos.

Las resistencias de los cables Rc1 y Rc2 que unen la PT100 se suman generando un error inevitable. El lector medirá una resistencia total $R(t)+Rc1+Rc2$ en vez de $R(t)$. Cuanto más grueso sea el cable menor será el valor de las resistencias Rc1 y Rc2 por lo que menor será el error en la lectura.

- Con 3 hilos

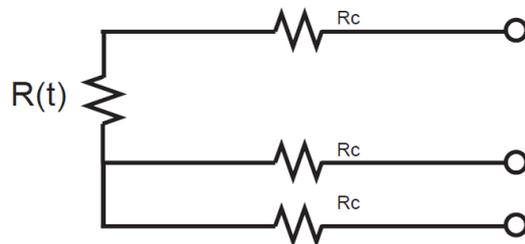


Ilustración 65. Modo de conexión PT100 con 3 hilos.

Los tres cables han de tener la misma resistencia eléctrica, se hace pasar una corriente conocida por los cables conectados en paralelo por lo que se obtiene $2Rc$. Luego se mide la resistencia del tercer cable y de uno de los dos anteriores para restarle $2Rc$ al valor medido y obtener $R(t)$

- Con 4 hilos

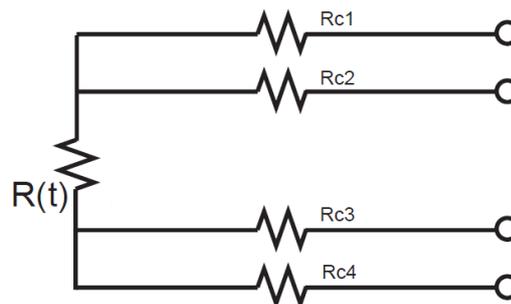


Ilustración 66. Modo de conexión PT100 con 4 hilos.

Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente I conocida a través de $R(t)$ provocando una diferencia de potencial V en los extremos de $R(t)$. Los cables 2 y 3 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables Rc2 y Rc3 será cero ($dV = I_c * Rc = 0 * Rc = 0$) y el voltímetro medirá exactamente el voltaje V en los extremos del

elemento $R(t)$. Finalmente, el instrumento obtiene $R(t)$ al dividir V medido entre la corriente I conocida.

5.5.7.1. Firmware

El firmware de una impresora 3D, como el de cualquier otra máquina es un puente entre el hardware y el software el cual se ejecuta en la placa de control y administra todas las ordenes en tiempo real de la máquina.

Cuando un software de control envía un G-code[25] a la impresora es el firmware el encargado de interpretar y traducir esos comandos de G-code en señales eléctricas las cuales son enviadas a los diferentes componentes de la impresora como motores, ventiladores, cartuchos calentadores, LCD, etc.

Por ejemplo, si se envía la orden "G1 X50 Y50" a la impresora, el firmware determina cuanto tiene que desplazarse el extrusor para llegar a las coordenadas $X=50$ mm e $Y=50$ mm, después envía señales eléctricas a los motores para que giren. A medida que el firmware recibe comandos de movimiento los agrega a una cola que se ejecuta en el orden recibido.

Marlin[43] es un firmware de código libre del proyecto RepRap[44] que surge de otros dos firmware llamados Sprinter[45] y Grbl[46]. Marlin se convirtió en agosto de 2011 en el único proyecto de código abierto.

Desde sus inicios Marlin ha sido creado para satisfacer las necesidades de los entusiastas del proyecto RepRap. En los antecedentes hemos visto que fabricantes como Ultimaker, Printrbot, Lulzbot y Prusa Research emplean Marlin o una variante de este en sus máquinas.

5.6. LAMINADO EN SISTEMAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

El laminado es el proceso de convertir un modelo 3D en el código legible por la impresora llamado G-code usando un programa de laminado. Los programas más populares son Slic3r PE (y su sucesor PrusaSlicer 2.0[47]), Simplify3D[48] y Cura[49].

Para la generación de G-code no solo es necesario un modelo 3D, sino también varios ajustes, parámetros y configuraciones. Dichos parámetros pueden afectar en muchas maneras a la generación del G-code y al proceso de impresión (como la dureza del modelo, la cantidad de detalle o la velocidad de impresión). También es posible modificar las piezas (escalarlas, rotarlas, cortar un trozo, etc.) y ubicarlas en la superficie de impresión.

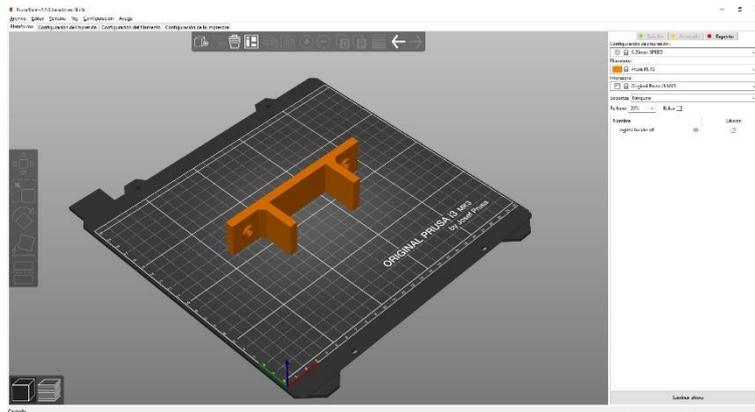


Ilustración 67. Captura de PrusaSlicer 2.2.0

En un sistema de modelado por deposición fundida, en el software encargado de la laminación [50], [51] se tiene en cuenta parámetros de:

- Configuración de impresión.
- Configuración del filamento.
- Configuración de la impresora.

Un desglose detallado y completo se puede encontrar en los anexos.

5.6.1. Ajustes básicos

- Paredes verticales / Perímetros: estas son las paredes exteriores del modelo y al ajustar las Paredes verticales, estamos ajustando cuántos perímetros necesitarán. El espesor de la pared resultante puede calcularse aproximadamente como: número de perímetros x diámetro de boquilla.
- Paredes horizontales / Capas macizas: se usa para configurar el número de capas inferiores y superiores del modelo que serán completamente macizas (relleno del 100%).
- Relleno: afecta al tiempo de impresión, resistencia de la pieza impresa y a la cantidad de filamento consumido. El relleno se ajusta como un porcentaje, con el 0 % tenemos una pieza hueca. Normalmente, entre el 10 % y el 20 % está bien. También es posible cambiar el patrón a utilizar para el relleno (mira más abajo).

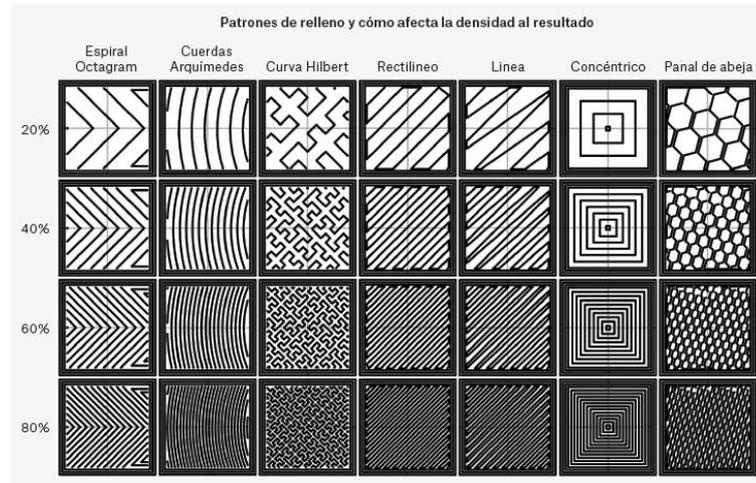


Ilustración 68. Patrones de relleno y como afecta la densidad al resultado

- Soportes: las estructuras de soporte sustentan los voladizos o las piezas que empiezan en medio del aire. Los soportes se diseñan para que sean fáciles de retirar, pero pueden dejar marcas en el modelo. Nuestro objetivo es minimizar el número de soportes necesario girando (o incluso diseñando) la pieza para conseguir una orientación óptima, donde solo unos pocos (o ninguno) soportes sean necesarios. Menos soportes significa que la impresión será más rápida y la pieza impresa tendrá mejor aspecto.
- Puentes: este es el único caso en el que la impresora puede imprimir en el aire sin tener soportes debajo de esa capa. Aunque es un caso especial. El extrusor puede arrastrar el filamento fundido en línea recta entre dos puntos sólidos. Esto significa que el puente tiene que ser paralelo a la superficie de impresión. La máxima longitud de un puente también se ve afectada por lo bien que refrigere la pieza impresa tu impresora 3D.
- Borde: para incrementar la adherencia de la pieza impresa a la base (por ejemplo, cuando se imprimen piezas pequeñas/estrechas), se recomienda usar un borde. Es una superficie plana adicional que evitará que la pieza se desprenda de la base a mitad impresión. Puede ser retirada fácilmente una vez terminada la impresión.
- Falda: a diferencia del borde, la falda no tiene contacto con la pieza impresa. Es una pared fina alrededor de la pieza impresa y normalmente tiene varios pisos. Es más habitual usarla cuando imprimimos ABS, que tiene tendencia a encoger y agrietarse cuando se enfría. La falda crea un microclima, que ayuda a bloquear la circulación del aire frío. Otro uso de la falda: puedes comprobar si la primera capa se adhiere bien y ajustar la altura del Z en vivo en caso contrario.

- Balsa: es una clase especial de estructura de soporte, que levanta toda la pieza sobre la base de impresión. Se emplea principalmente con ABS, debido a que ayuda a prevenir el arqueado / levantamiento de la pieza de la superficie de impresión
- Enfriado: es aconsejable enfriar activamente las piezas impresas – especialmente las estructuras finas y altas, que no tienen tiempo suficiente para enfriarse por sí mismas, debido a que el extrusor tiende a permanecer en la misma zona por largos periodos de tiempo. [52]

5.7. MATERIALES DE IMPRESIÓN EN MÁQUINAS DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Los materiales empleados por las impresoras 3D actuales se clasifican en tres grandes grupos, que son:

- Plásticos
- Metales
- Otros

Los materiales más comunes empleados en el tipo de impresoras de modelado por deposición fundida analizadas en los antecedentes son PLA, ASA, ABS, PET, PETG, HIPS, Nailon, TPE, TPU y PP.

5.7.1. PLA

El ácido poliláctico [53] o poliláctico (PLA) es un polímero termoplástico cuyos materiales de base se obtienen a partir de almidón de maíz o de yuca o mandioca, o de caña de azúcar. Además, puede ser biodegradable bajo ciertas condiciones a temperaturas del orden de 60 °C, se puede degradar en agua y óxido de carbono.

Es uno de los materiales más populares de impresoras de modelado por deposición fundida. Produce piezas de gran dureza. Es la elección ideal para imprimir piezas grandes debido a su baja expansión térmica (las piezas no se comban en la base de impresión) y para imprimir modelos pequeños de mucho detalle. Es el único material apropiado para capas de 50 micras [54].

- Ventajas:
 - Fácil de imprimir
 - Impresión de modelos con mucho detalle
 - Impresión de piezas grandes sin problemas

- Duro, poco flexible
- Casi inodoro
- Barato
- Amplia selección de colores
- Inconvenientes
 - Quebradizo
 - Baja resistencia a la temperatura (60°C)
 - Difícil de postprocesar
 - No adecuado para uso en exteriores.

Los usos típicos del PLA son prototipos, juguetes, figuras, joyería y modelos de arquitectura.

Detalles de uso [54]:

Cuando se va a postprocesar lo mejor es el lijado con agua. Sin agua, el plástico se calienta por la fricción y se funde. El PLA sólo es soluble en productos como el cloroformo o el benceno caliente.

- Temperatura de la boquilla: 215°C
- Temperatura de la base: 60°C
- Enfriamiento de capa: sí

5.7.2. ASA/ABS

El acrilonitrilo butadieno [55] estireno es un copolímero obtenido de la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, resultado de la combinación de los tres monómeros. el estireno contribuye a la facilidad de las características del proceso, el acrilonitrilo imparte la resistencia química e incrementa la dureza superficial y el butadieno contribuye a la fuerza de impacto y dureza total. Las porciones pueden variar del 15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno.

El resultado es una larga cadena de polibutadieno entrecruzada con cadenas más cortas de poli (estireno-co-acrilonitrilo). Los grupos nitrilo de las cadenas vecinas, siendo polares, atacan cada una de las bandas de las cadenas juntas haciendo el ABS más fuerte que el poliestireno puro.

El acrilonitrilo estireno acrilato es un polímero constituido por acrilonitrilo, estireno y acrilato. Desde el punto de vista del modelado por deposición fundida son muy similares [54].

- Ventajas

- Alta resistencia al impacto y al desgaste
- Muy buena resistencia al calor
- Estable a los UV
- Soluble en acetona
- Suavizable con vapor de acetona
- Inconvenientes
 - Difícil de imprimir
 - Tendencia a arquearse
 - Emite olor al imprimir

Detalles de uso:

- Temperatura de la boquilla: 245-265°C
- Temperatura de la base: 90-110°C
- Enfriamiento de capa: no

5.7.3. PET/PETG

El tereftalato de polietileno (PET) es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. El PETG aparece por la copolimerización de del PET, el proceso se basa en agregar ciclohexano dimetanol (CHDM) en lugar de etilenglicol, consiguiendo un bloque de átomos más largo, donde las cadenas lindantes no encajan.

Junto con el PLA el PETG es uno de los materiales más populares en el modelado por deposición fundida.

- Ventajas:
 - Resistencia a alta temperatura.
 - Fácil de imprimir.
 - Baja expansión térmica.
 - Ductilidad y resistencia.
 - Lijado fácil
 - Casi inodoro
 - Superficie brillante
 - Perfecta adherencia de la capa
 - No absorbe agua
 - Reciclable
- Inconvenientes:
 - No es adecuado para imprimir modelos pequeños
 - Posibilidad de hilos

- Los puentes son problemáticos
- Fuerte adherencia a la caja de impresión
- No se puede alisar con acetona
- Los soportes pueden ser difíciles de eliminar.

Los usos típicos de PET/PETG son componentes mecánicos, soportes e impresiones impermeables.

Detalles de uso [54]:

Tiende a gotear y puede dejar hilos durante los desplazamientos de la impresión, para compensar se puede aumentar la retracción y modificar las temperaturas.

- Temperatura de la boquilla: 240°C
- Temperatura de la base: 80-100°C
- Enfriamiento de capa: sí

5.7.4. *HIPS*

El Poliestireno de Alto Impacto es una de las variedades existentes dentro de los poliestirenos. Dado que el poliestireno es un polímero muy frágil a temperatura ambiente, se modifica mediante la adición de polibutadieno, para mejorar su resistencia al impacto.

En modelado por deposición fundida se utiliza comúnmente como material soporte. Este material se disuelve con lemonesol y deja una impresión suave sin marcas después de retirar los soportes.

- Ventajas
 - Solubilidad en el lemonesol
 - Suavidad en las capas
 - Más ligero que el ABS
- Desventajas
 - Difícil de imprimir
 - Tendencia a contraerse
 - Olor al imprimir.

Los usos típicos son material de soporte para ASA/ABS y carcasas de protección.

Detalles de uso [54]:

- Temperatura de la boquilla: 215-225°C
- Temperatura de la base: 90-110°C
- Enfriamiento de capa: no

5.7.5. *Nailon*

El nailon es un polímero sintético que pertenece al grupo de las poliamidas. El nailon se genera formalmente por policondensación de un diácido con una diamina. La cantidad de átomos de carbono en las cadenas de la amina y del ácido se puede indicar detrás de las iniciales de poliamida. El más conocido, el PA6.6 o nailon 6,6, es por lo tanto el producto formal del ácido hexanodioico (ácido adípico) y la hexametilendiamina.

- Ventajas:
 - Propiedades mecánicas
 - Resistencia química
 - Flexible pero fuerte
- Inconvenientes
 - Debe almacenarse en un ambiente seco
 - Difícil de imprimir
 - Puede deformarse

Los usos típicos de este material son: tornillos, tuercas, piezas de reemplazo, cajas de engranajes.

Detalles de uso [54]:

- Temperatura de la boquilla: 240°C
- Temperatura de la base: 80-90°C
- Enfriamiento de capa: no

5.7.6. *TPE/TPU*

Los elastómeros termoplásticos [56] (TPE) son una clase de polímeros o mezcla física de polímeros (generalmente un plástico y un caucho) que dan lugar a materiales con características termoplásticas y elastoméricas.

El poliuretano termoplástico (TPU) es una de las variedades existentes dentro de los poliuretanos.

TPE y TPU, al igual que ASA y ABS, son muy similares desde el punto de vista del modelado por deposición fundida.

- Ventajas
 - Flexibilidad
 - Deformación elástica
 - Buena adherencia de capa
 - Resistencia a la abrasión

- Inconvenientes
 - Requiere pasos adicionales para cargar el filamento
 - Debe de imprimirse lentamente
 - Debe de almacenarse en ambiente seco

Detalles de uso [54]:

- Temperatura de la boquilla: 230-260°C
- Temperatura de la base: 45-65°C
- Enfriamiento de capa: no

5.7.7. PP

El polipropileno [57] (PP) es el polímero termoplástico, perteneciente al grupo de las poliolefinas, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno.

Es ideal para aplicaciones de alto número de ciclos y debido a su resistencia a la fatiga.

- Ventajas:
 - Dúctil
 - Parcialmente elástico
 - Alta resistencia térmica
- Inconveniente
 - Tendencia a contracción
 - Mala adhesión

Detalles de uso:

- Temperatura de boquilla: 210-230°C
- Temperatura de la base: 95-100°C
- Enfriamiento de capa: sí

6. SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO

6.1. DESPLAZAMIENTO EN EJES

En el marco teórico se analizaron los diferentes sistemas de guiado lineal, se vio que el patín requiere de una precisión de fabricación y montaje de la máquina muy alta. Si no se consigue, el patín funciona peor que alternativas como las varillas lisas o las extrusiones v-slot las cuales son soluciones de menos precisión. Esta razón junto con el coste que estos productos tienen hace que su uso no esté justificado.

Por otro lado las extrusiones v-slot requieren un uso concreto de extrusiones de aluminio, así como un carro y ruedas como se vio en 5.5.6.2.3 por lo tanto esta solución, aun siendo interesante es más compleja y limitante que las varillas lisas.

El fabricante Misumi[58] produce o fabrica tanto varillas como rodamientos. Estas varillas están específicamente diseñadas para funcionar con sus rodamientos por lo que es una buena decisión adquirir este conjunto del mismo fabricante como sistema de guiado lineal para los ejes X e Y de la máquina, serán entonces estos ejes, accionados por correas.

6.1.1. Ejes XY

A la hora de elegir una varilla hay que dimensionar el diámetro, el fabricante ofrece en su catálogo[59] un rango de 3 a 50mm. Se analiza por elementos finitos en Inventor las varillas de 8mm con las longitudes en los ejes y se observa que no se deforman significativamente con una fuerza de 20N (2kg), esta cantidad se debe a:

- Peso del carro (rodamientos y pieza fabricada)
- Peso del extrusor (sistema de accionamiento y fusor)
- Resistencia que ofrece el filamento al ser desbobinado.

El informe del estudio está disponible en Anexos.

Por lo tanto, las referencias de los productos son:

- Varilla eje X: SSFMR8 - 370
- Varilla eje Y: SSFMR8 - 330
- Rodamiento lineal eje X: LMU8 (x4)
- Rodamiento lineal con alojamiento eje Y: LHBB8 (x4)

La principal ventaja de un rodamiento con alojamiento a uno sin alojamiento es que desaparece la necesidad de fabricar un acoplamiento y su instalación.



Ilustración 69. Rodamiento lineal eje X (izq.), rodamiento lineal eje Y (dcha.)

6.1.2. Eje Z

Por simplificación el eje Z usará las mismas varillas y rodamientos y a esto hay que añadirle el sistema de accionamiento que en este caso será un husillo que girará solidario al motor. Estos husillos se pueden acoplar al eje del motor a través de un acoplamiento flexible como se ha visto en 5.5.6.1.2.

Otra solución es integrar el husillo en el eje del motor de manera que este sustituye al eje y elimina la necesidad del acoplamiento.

- Varilla eje Z: SSFMR8 – 320 (x2)
- Rodamiento lineal: LMU8 (x4)
- Husillo (incluido en el motor) (x2)

6.2. ACCIONAMIENTO POR HUSILLO

En base al dimensionamiento de las varillas lisas se eligen unos husillos de características similares (dimensiones y material). La referencia del husillo [60] es:

- MTSTR8 – 310 (x2)

Determinado el husillo es necesario calcular la cantidad de pasos que la electrónica necesita generar para mover el eje 1mm.

El husillo en cuestión tiene un paso de rosca de 2 mm y 4 entradas. Como se vio en el marco teórico es necesario conocer el ángulo de paso del motor y los micro pasos del controlador. Al no estar aun dimensionado el motor no se dispone de especificaciones técnicas pero en los antecedentes analizados el motor más común es NEMA17 el cual tiene un ángulo de 1,8, por otro lado los controladores analizados tienen una resolución de 1/16 o 1/32 así que se calcula para ambos supuestos y en la configuración del firmware se introducirá la cifra correcta una vez estén los controladores seleccionados.

6.2.1. Supuesto 1/16

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{\frac{360}{1,8} \times \frac{1}{1}}{2 \text{ mm/paso} * 4 \text{ entradas}} = 400$$

6.2.2. Supuesto 1/32

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{\frac{360}{1,8} \times \frac{1}{1}}{2 \text{ mm/paso} * 4 \text{ entradas}} = 800$$

6.3. ACCIONAMIENTO POR CORREAS

Las correas más empleadas en la impresión 3D están fabricadas de goma para ser flexibles y un material de refuerzo para no deformarse. Es necesario que el número de dientes de la polea no sea bajo para evitar que se salte dientes, si esto ocurriera produciría un desplazamiento de la capa de impresión.

- Polea: GT2-16

En el extremo opuesto a la polea se puede colocar otra polea tensora de las mismas características o un rodamiento:

- Rodamiento: 623h

El dimensionamiento de las poleas se hace de manera similar al de los husillos, se supone que el 1,8 como el ángulo del motor y se realizan dos supuestos:

6.3.1. Supuesto 1/16

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{\frac{360}{1,8} \times \frac{1}{1}}{2 \text{ mm/paso} * 16 \text{ dientes}} = 100$$

6.3.2. Supuesto 1/32

$$\text{Pasos por milímetro} = \frac{\frac{360}{1,8} \times \frac{1}{1}}{2 \text{ mm/paso} * 16 \text{ dientes}} = 200$$

6.4. ACTUADORES

6.4.1. Motores

Se necesitan un total de cinco motores para el accionamiento completo de la máquina. Dos de ellos accionan los ejes X e Y tienen un funcionamiento similar, por otro lado, otro motor acciona el extrusor y por último dos motores accionan eje Z.

El motor que trabaja en condiciones más desfavorables es el eje Y ya que este está compuesto por 4 rodamientos, el ensamblaje de la superficie de impresión compuesto de un carro, separadores, la resistencia de silicona, etc. También hay que considerar el peso de la pieza que se va a imprimir sobre dicha superficie la cual puede variar considerablemente en función del tamaño y densidad (infill). Teniendo todo esto en consideración, $2,5kg$ es la masa estimada máxima.

Simplificando los cálculos teóricos desarrollados en el marco teórico (5.5.6.1.1) para dimensionar un motor hay que calcular la fuerza necesaria para acelerar la masa anteriormente mencionada.

Para ello hay que definir antes una aceleración (lineal). Normalmente este tipo de máquinas utilizan aceleraciones 10 veces mayores que las velocidades máximas por lo que con $200mm/s$ de velocidad máxima tendremos $2000mm/s^2$ de aceleración.

La fuerza por lo tanto necesaria es:

$$F = 2,5kg * \frac{2m}{s^2} = 5N$$

Ahora hay que calcular el par, para ello hay que tomar los datos de la polea (6.3) y calcular el radio:

$$r = \frac{2 \times 16}{2\pi} = 5,1mm$$

El par por lo tanto es:

$$\tau = 5N * 0,51cm = 2,55Ncm$$

Esto supone que teóricamente necesitamos un par de $2,55Ncm$ para acelerar a $2000mm/s^2$ una masa de $2,5kg$.

Lo que ocurre en la realidad es que los motores no son perfectamente eficientes, conforme se incrementa la velocidad, se pierde par. Para acomodar el dimensionamiento a esta realidad vamos a trabajar con la velocidad máxima que previamente habíamos indicado que es de $200mm/s$.

Suponiendo un motor de 200 pasos por revolución y las características de la puela calculamos que el avance en mm por pasos es de $0,16 \text{ mm/paso}$ y por lo tanto la velocidad máxima es de 1250 pasos/s o lo que es lo mismo 375 rpm .

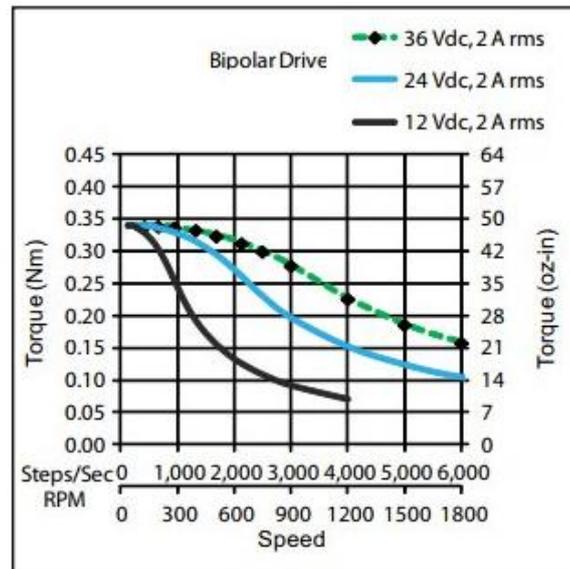


Ilustración 70. Curva par-velocidad NEMA17

En la curva se ve como a 12 y 24V para las revoluciones máximas requeridas se dispone del par necesario.

La referencia del motor es la siguiente:

- NEMA 17 Wantai 42BYGHW811

7. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

En esta sección se hace un análisis de los posibles componentes electrónicos así como la elección y justificación de los componentes seleccionados.

7.1. CONTROLADORES

Tratando de minimizar el uso de *vitaminas* como parte de los objetivos específicos del proyecto y habiendo analizado en los antecedentes máquinas que usan el sensorless homing emplearemos unos controladores que tengan este modo de funcionamiento, evitando por lo tanto el uso de finales de carrera en ejes X e Y.

Para ello necesitaremos un tipo de controlador que tenga la tecnología StallGuard[61] así que optar por el fabricante Trinamic es lo más lógico. En la siguiente tabla aparecen los controladores de Trinamic que tienen esta tecnología y podrían cumplir con la característica de StallGuard.

| Nombre | Alimentación | Corriente | Micro pasos | SPI | UART | Step/Dir |
|----------------|--------------|-----------|-------------|-----|------|----------|
| TMC2041 | 5-26V | 1,1A | 1/256 | Sí | Sí | Sí |
| TMC2130 | 4,75-46V | 1,2A | 1/256 | Sí | No | Sí |
| TMC2202 | 4,75-36V | 1,4A | 1/256 | No | Sí | Sí |
| TMC2208 | 4,75-36V | 1,4A | 1/256 | No | Sí | Sí |
| TMC2209 | 4,75-29V | 2A | 1/256 | No | Sí | Sí |
| TMC2300 | 2-11V | 1,2A | 1/256 | No | Sí | Sí |
| TMC2660 | 9-30V | 2,8A | 1/256 | Sí | No | Sí |

Tabla 1. Controladores de Trinamic con la tecnología StallGuard

De todos los controladores anteriores uno de los más interesantes es TMC2209[62] [63] no solo porque tiene la tecnología StallGuard sino porque también incluye:

- CoolStep[64]
- SpreadCycle[65]
- StealthChop[66]
- DcStep[67]

7.2. PLACA

Con la elección de los controladores TMC2209 surge la necesidad de encontrar una placa con soporte para el modo UART. En la siguiente tabla podemos comparar unas de las placas comerciales más extendidas

| Nombre | Hardware | Modo | Alimentación | SD | Firmware | Controladores |
|-------------------------|-----------------|---------------------|--------------|----|--------------|---------------|
| Duet 3 | ATSAME70 Q20 | SPI | 12-24V | Sí | RepRap | TMC2160/5160 |
| Xpresso Smoothie | LPC1769 | Step/Dir | 12-24V | Sí | Smoothie | No integrados |
| Smoothieboard v2 | LPC4300 | SPI | 12-24V | Sí | Smoothieware | No integrados |
| SKR 1.4 | LPC1768 | Step/Dir, SPI, UART | 12-24V | Sí | Marlin | No integrados |
| Einsy RAMBo | Atmega2560 | SPI | 24V | No | Marlin | TMC2130 |
| RAMPS 1.7 | Atmega2560 | SPI | 12V | No | Marlin | No integrados |

Tabla 2. Comparación de placas comerciales

La placa SKR V1.4[68] del fabricante BigTreeTech es compatible tanto con el modo Step/Dir, modo SPI y modo UART colocando un jumper entre los pines que indica el fabricante. Al no tener los controladores integrados se abre la posibilidad de emplear diferentes controladores para extrusor, eje x, eje y o eje z y que funcionen en diferentes modos.

En la siguiente imagen se puede ver la ubicación de los pines:

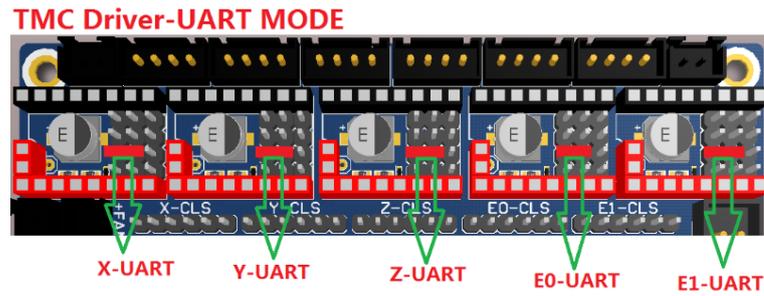


Ilustración 71. SKR 1.4 Diagrama modo UART

La vista general de la placa es la siguiente:

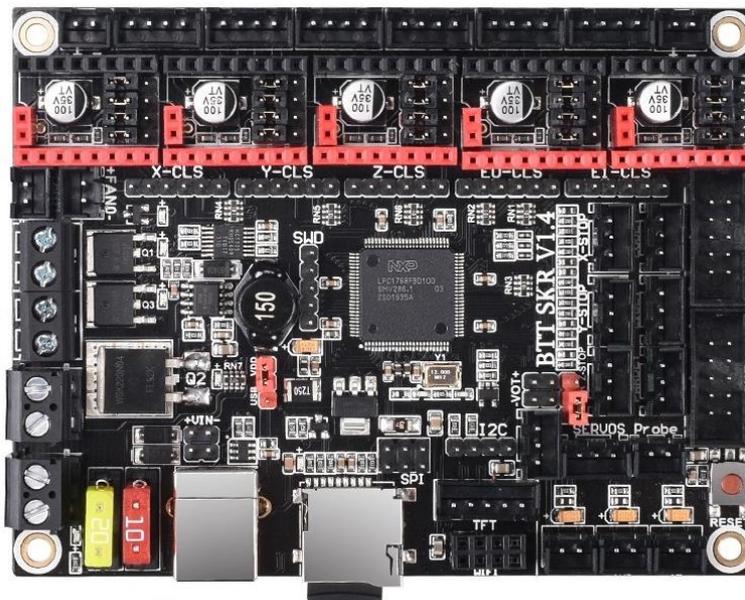


Ilustración 72. SKR 1.4 Vista general[69]

7.2.1. Conexiones

El esquema de conexión de los componentes se puede ver en la siguiente imagen, a continuación:

En el manual del fabricante aparece la siguiente imagen resumiendo lo arriba explicado, en ella vemos el lector de tarjetas SD, pines EXP1 y EXP2 para conectar un LCD y el botón de reset.

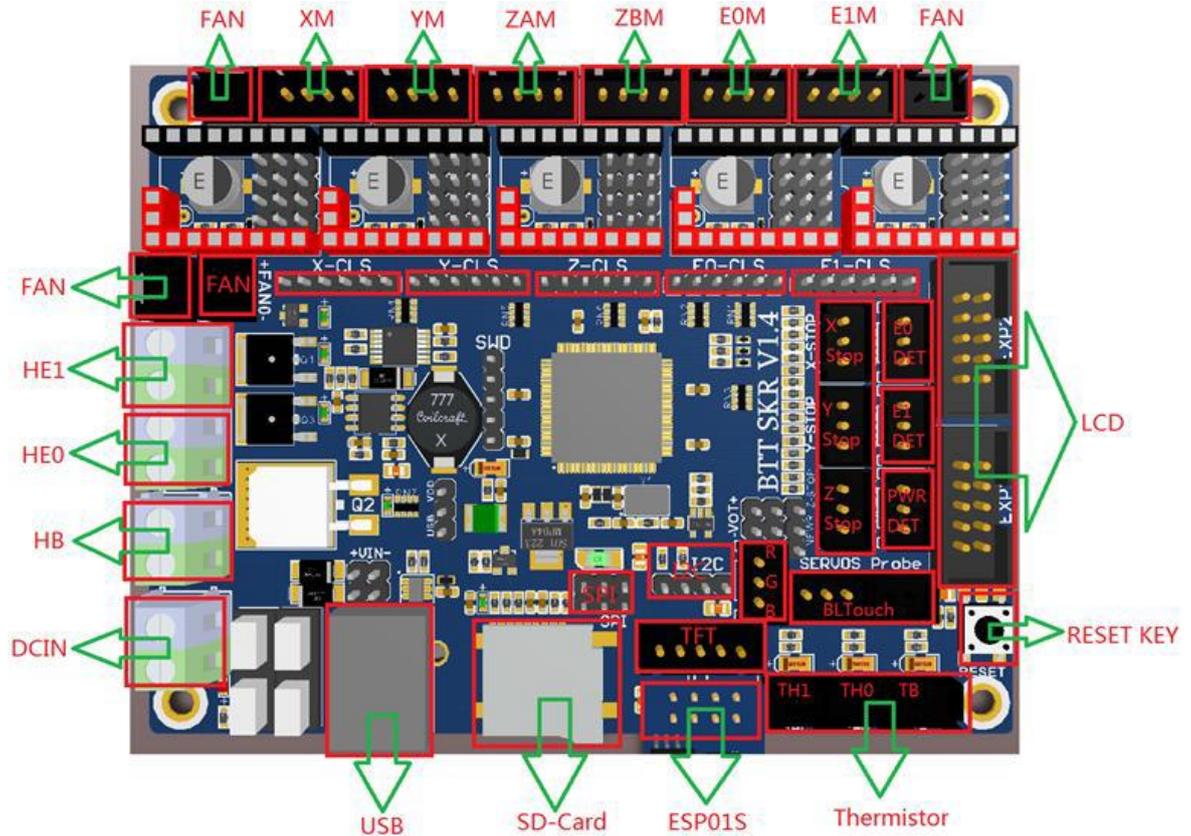


Ilustración 74. SKR Placa base, diagrama de cableado[70]

7.2.2. Alimentación

El fabricante recomienda una fuente 24V 15A.

7.3. CAMA CALIENTE (Y SUPERFICIE DE IMPRESIÓN)

Para cama caliente un elemento limitador es la salida de corriente continua que dispone la placa. En la placa base seleccionada la salida es de 24V. Se podría por lo tanto buscar una solución de baquelita comercial y ceñirnos a una potencia y a unas dimensiones limitadas por el fabricante o fabricar una cama caliente con una placa de aluminio y adherirle la cama de silicona de 220V, como vimos en los antecedentes y en el marco teórico. La conexión a la placa se hace a través de un relé.



Ilustración 75. Cama caliente de silicona

- Cama caliente silicona 260x260 450W
- Relé de estado sólido AC 10A-100A 3V-32V a DC 220V

El fabricante BuildTak tiene una superficie de impresión comercial que consta de tres partes:

- Superficie de impresión rugosa (derecha)
- Lámina de acero flexible (centro)
- Base de montaje magnética (izquierda)



Ilustración 76. Superficie de impresión flexible (BuildTak)

Su funcionamiento es el siguiente, la base de montaje se instala sobre la lámina de aluminio sobre la que ya está instalada la cama caliente de silicona. Esta instalación se hace mediante un adhesivo. Esta base de montaje tiene una serie de imanes lo que hace que la lámina de acero flexible se mantenga fija sobre ella sin ningún tipo de anclaje. Por último a esta lámina de acero dispone de una superficie rugosa que mejora la adhesión de las piezas y el acabado de la primera capa.

La referencia del producto es:

- BuildTak FlexPlate System (250x250mm)

7.4. SENSOR DE NIVELACIÓN

El sensor de nivelación ofrece la posibilidad de automatizar y la calibración de la primera capa al inicio de cada impresión. Esto tiene la ventaja principal de suprimir el error resultante de una calibración manual.

La referencia del sensor, fabricado por Prusa Research es:

- PINDA 2



Ilustración 77. Sensor PINDA 2

7.5. VENTILADORES

Es necesario el uso de dos ventiladores, uno para disipar el calor del extrusor y otro para enfriar la capa de impresión. Ambos ventiladores trabajan a 5V. Tienen que ser pequeños y ligeros ya que van a estar montados en el carro del eje XY y no pueden añadir mucha masa al conjunto ya que este está en continuo movimiento.

Para el extrusor el ventilador elegido es Noctua NF-A4x10 FLX[71], las características son las siguientes:

- 0,05A
- 5V



Ilustración 78. Ventilador Hotend, Noctua NF-A4x10 FLX

Una característica fundamental que añade mucho atractivo a este ventilador es su sonoridad, 17,9 dBA, ya que este ventilador va a estar en funcionamiento constantemente.

Para el ventilador de capa se opta por otro tipo de ventiladores, ventiladores radiales. El flujo de aire sale por una sección pequeña lo cual es ideal para enfriar con precisión una zona. LDO Motors[72] fabrica un ventilador con las siguientes características:

- 0,3A
- 5V
- 29dBA



Ilustración 79. LDO Radial cooling fan

8. SISTEMA DE EXTRUSIÓN

El sistema de extrusión está formado por un extrusor encargado de introducir y retraer el filamento y por un fusor. El conjunto de ambos es a través del movimiento de deposita el filamento sobre la superficie de impresión.

8.1. FUSOR

Para la elección del fusor hay que tener en cuenta el diámetro del filamento, en este caso 1,75mm. Los fusores modulares ofrecen la ventaja de reparación y sustitución de piezas en caso de avería o mantenimiento. Uno de los fabricantes más populares es E3D con su sexta revisión de su fusor All Metal. Este fusor está montado en máquinas de fabricantes como Prusa Research.



Ilustración 80. Fusor All Metal V6 de E3D

Ventajas que aporta este tipo de diseño:

- Fácil mantenimiento.
- Boquillas intercambiables.
- Al ser modular permite el cambio de la resistencia si se quisiera en un futuro imprimir materiales más avanzados.
- Excelente refrigeración con un diseño muy revisado de disipador.

La referencia del fusor es:

- V6 All-Metal HotEnd. Input Diameter 1,75mm, Direct drive.

8.2. EXTRUSOR

En cuanto al extrusor es necesario encontrar una solución compatible con el fusor V6 de E3D. Uno de los problemas que aparecen en la extrusión es la deformación del

filamento al su paso por la rueda dentada que hace el agarre. Como se vio en el estudio de las tecnologías y componentes este problema desaparece con extrusores de doble rueda dentada. Fabricantes como Bondtech han popularizado este tipo de sistemas.

Dada la popularidad del fusor V6 de E3D fabricantes como Bondtech producen sistemas de extrusión que se acoplan a este fusor:



Ilustración 81. Extrusor BMG de Bondtech

En la siguiente imagen se puede ver la combinación de ambos elementos, el fusor y el extrusor.

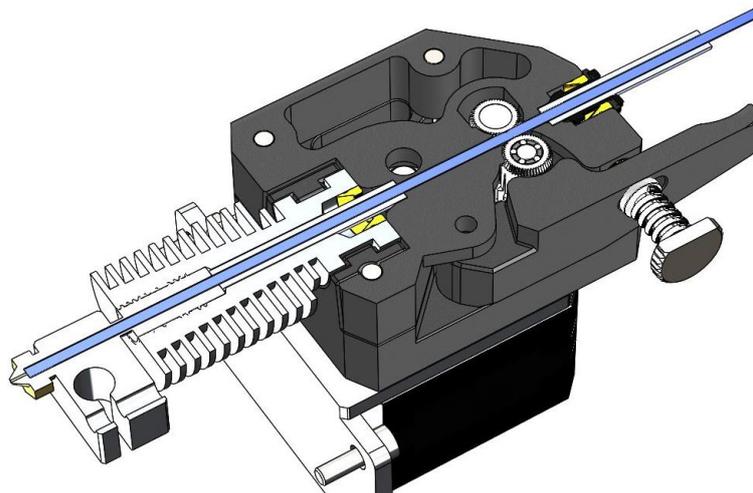


Ilustración 82. Sistema de extrusión completo, vista de corte.

Se ve como el filamento de color azul atraviesa el extrusor (negro) para entrar al fusor (blanco) hasta salir por la boquilla.

La referencia del producto es la siguiente:

- Bondtech Upgrade Kit Mosquito Fit.

9. FABRICACIÓN DE PIEZAS

Las siguientes piezas son de diseño propio. Unas de ellas han sido diseñadas con la intención de ser fabricadas con una impresora 3D, el programa empleado ha sido Autodesk Inventor y se han exportado a través del entorno de Impresión en 3D del mismo programa. El archivo exportado STL ha sido importado en PrusaSlicer para su laminado. En definitiva se ha seguido el mismo proceso detallado en el apartado Estudio de tecnologías y componentes (5.3).

Para que las piezas tengan una duración alta se han elegido la siguiente configuración de parámetros de impresión:

- Altura de capa: 0,2 mm
- Filamento: PETG
- Relleno: 20%

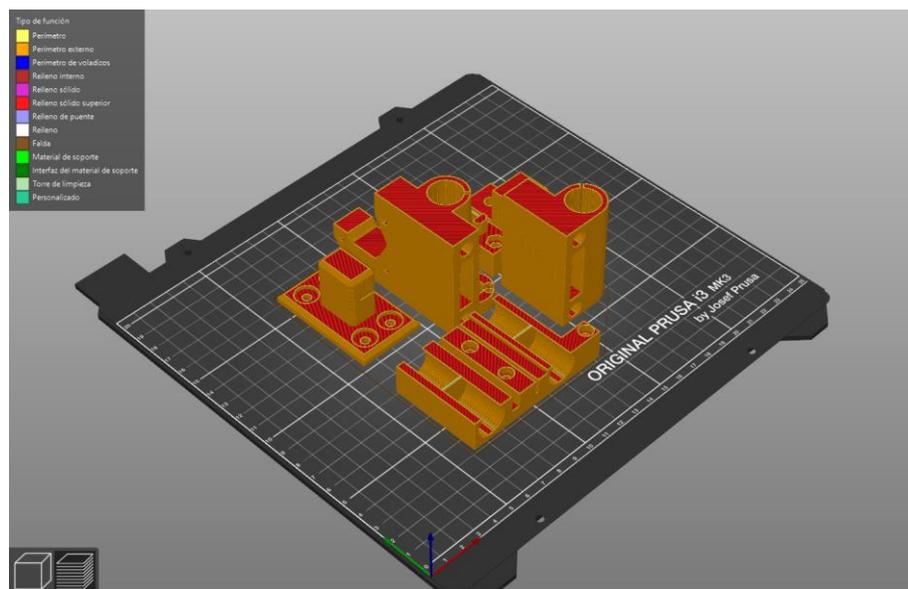


Ilustración 83. Vista previa de la superficie de impresión.

El software estima una duración de la impresión de 11h 30 minutos aproximadamente, 115 gramos de filamento lo que equivaldría a 3,20€.

| Información del laminado | |
|------------------------------------|----------|
| Filamento usado (m) | 37.58 |
| Filamento usado (mm ³) | 90383.53 |
| Filamento usado (g) | 114.79 |
| Coste | 3.19 |
| Tiempo estimado de impresión: | |
| - modo normal | 11h 24m |
| - modo silencioso | 11h 29m |

Ilustración 84. Información del laminado.

9.1. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

9.1.1. Soporte Eje X

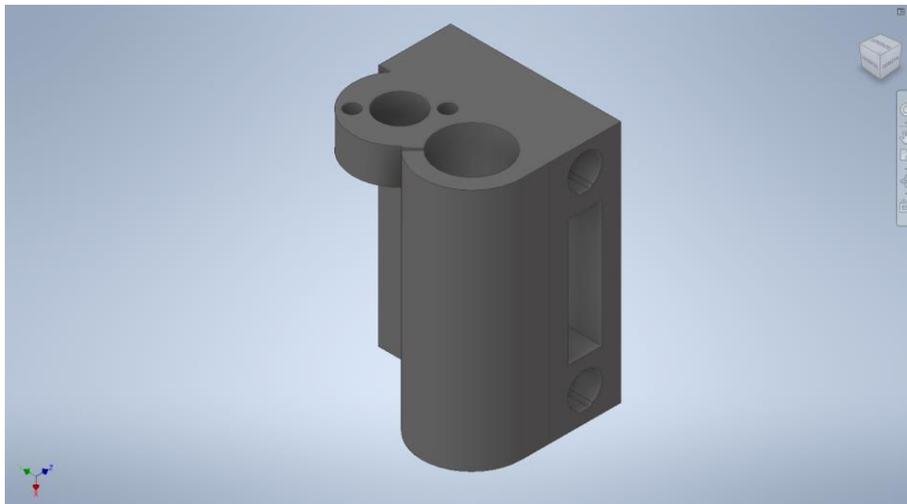


Ilustración 85. Diseño soporte Eje X.

9.1.2. Tensor Eje X

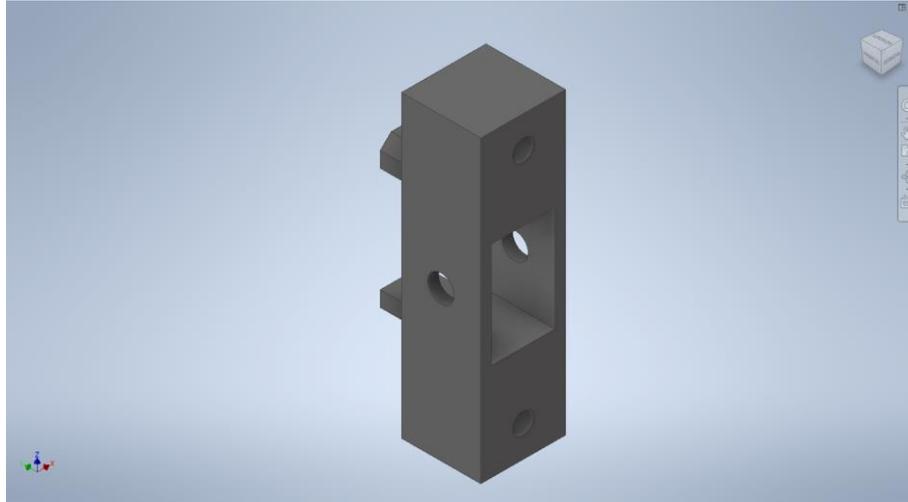


Ilustración 86. Diseño tensor Eje X.

9.1.3. Carro

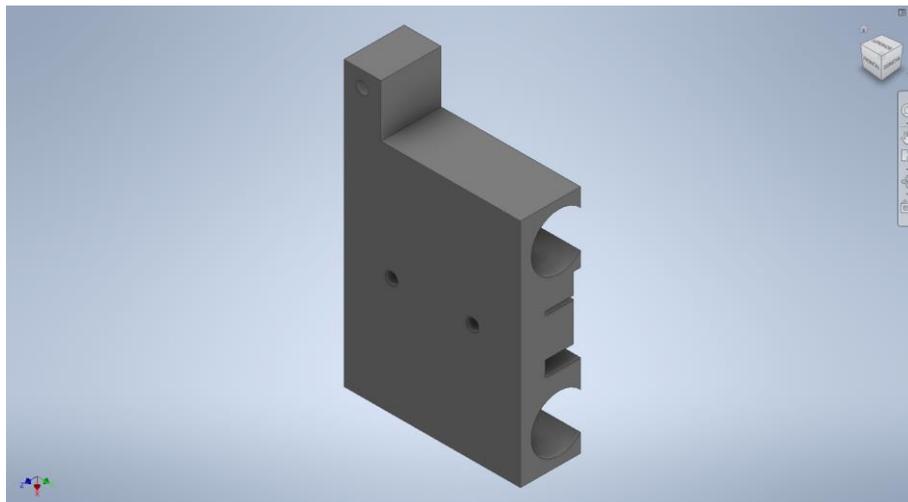


Ilustración 87. Carro Eje X.

9.1.4. Soporte motor Eje X

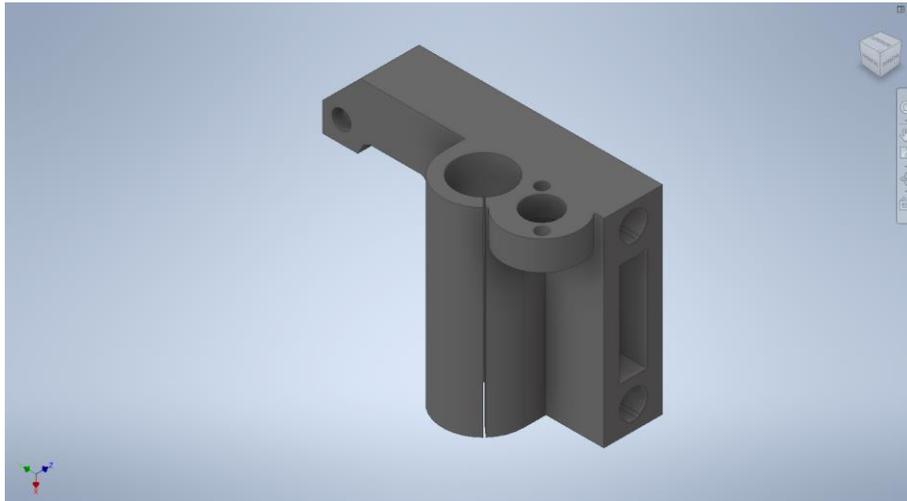


Ilustración 88. Diseño soporte motor Eje X.

9.1.5. Idler Eje Y

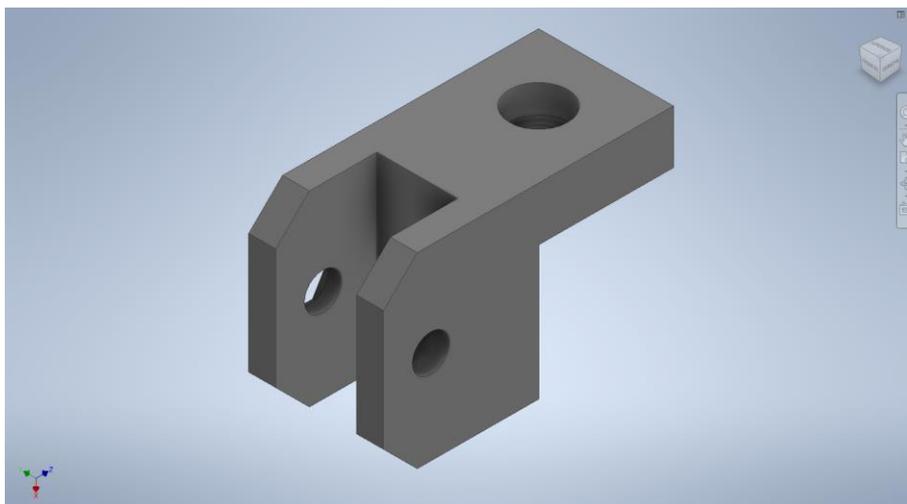


Ilustración 89. Diseño extremo Eje Y.

9.1.6. Tensor Eje Y

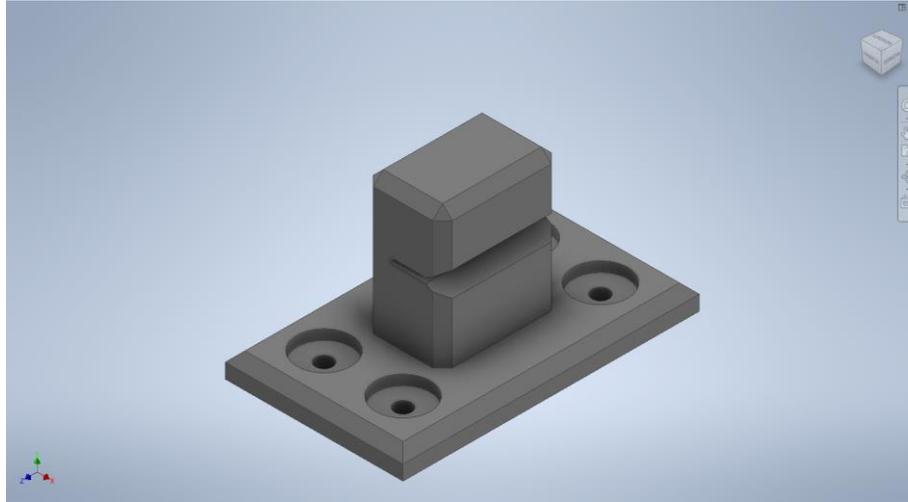


Ilustración 90. Diseño tensor Eje Y.

Otro tipo de piezas como las indicadas a continuación han sido fabricadas a través de mecanizado con láser. Se parte de una lámina de acero de 3mm de espesor.

9.2. MECANIZADO

9.2.1. Esquina

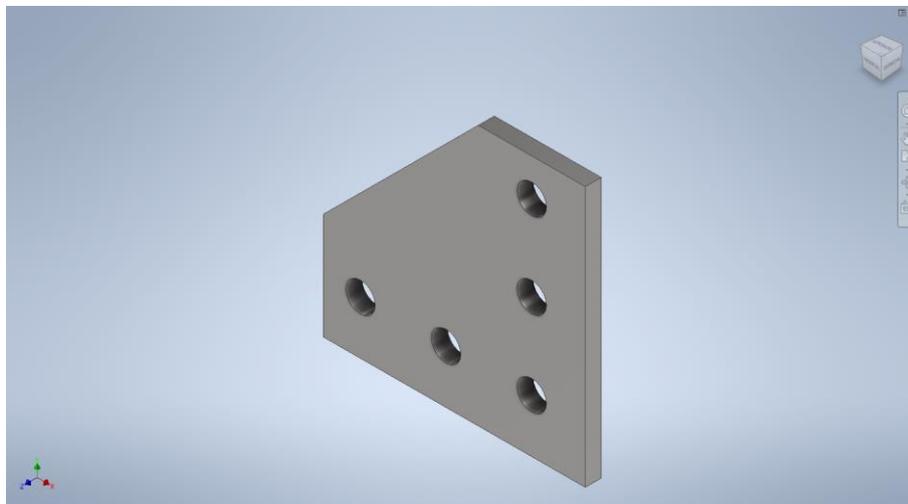


Ilustración 91. Diseño pletina esquina.

9.2.2. Lateral

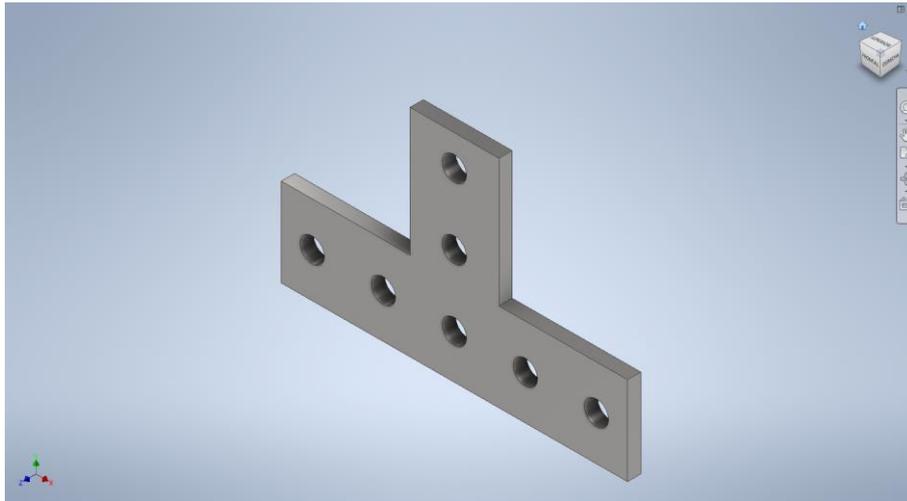


Ilustración 92. Diseño pletina lateral T.

9.2.3. Soportes motores Eje Z

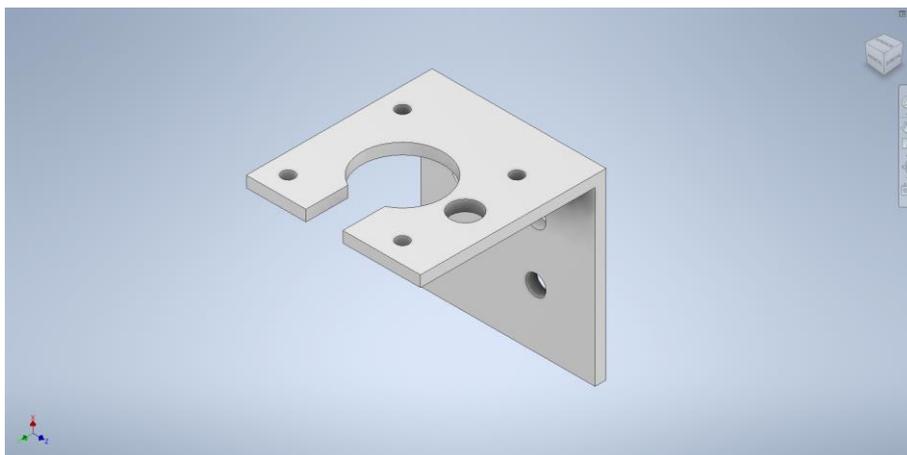


Ilustración 93. Diseño soporte motor Eje Z (derecho).

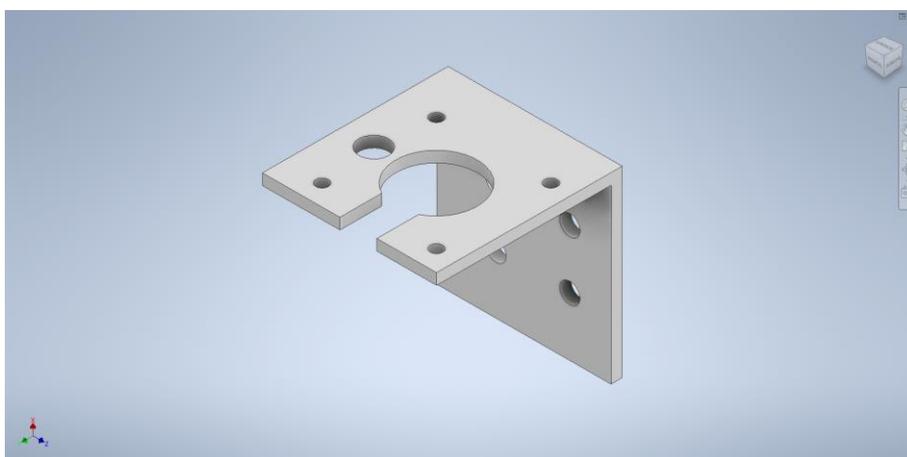


Ilustración 94. Diseño soporte motor Eje Z (izquierdo).

9.2.4. Soporte motor Eje Y

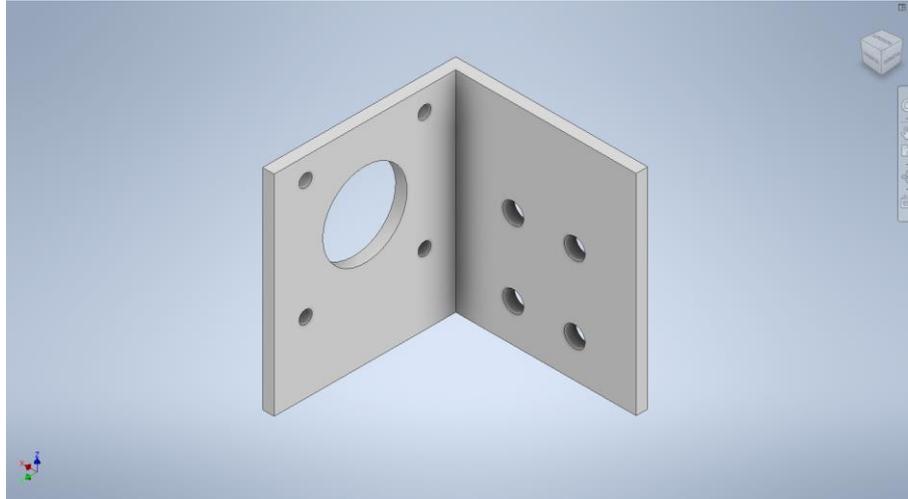


Ilustración 95. Diseño soporte motor Eje Y.

9.2.5. Carro XY

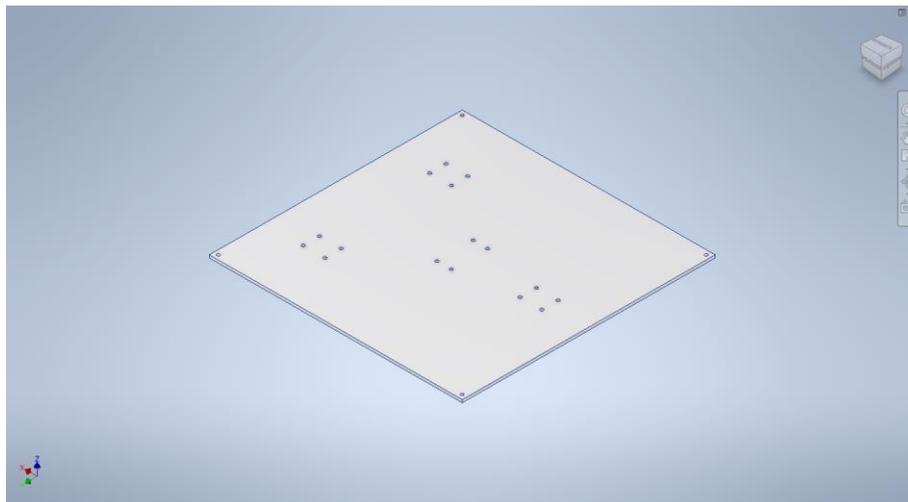


Ilustración 96. Diseño Carro XY.

Los planos de las piezas mencionadas anteriormente así como los conjuntos y las listas de materiales se pueden consultar en Anexos.

10. CONSTRUCCIÓN DEL CUADRO

El cuadro o estructura de la máquina está diseñado con la única intención de lograr máxima robustez para minimizar vibraciones como resultado del movimiento o desplazamiento de los ejes a altas velocidades.

En un análisis de vibraciones[73] llevado a cabo en 2017 sobre una Pursa i3 MK2 Stefan Hermann concluye que para reducir las vibraciones hay que hacer todo lo posible para aumentar la frecuencia de resonancia. Ejemplos o sugerencias que aporta son: colocar la máquina en una superficie sólida, apretar tornillos y tuercas hasta lograr la máxima rigidez o eliminar masa innecesaria.

Siguiendo estos consejos he tratado de obtener uniones rígidas entre los componentes y de reducir masas innecesarias.

El cuadro diseñado es el siguiente:

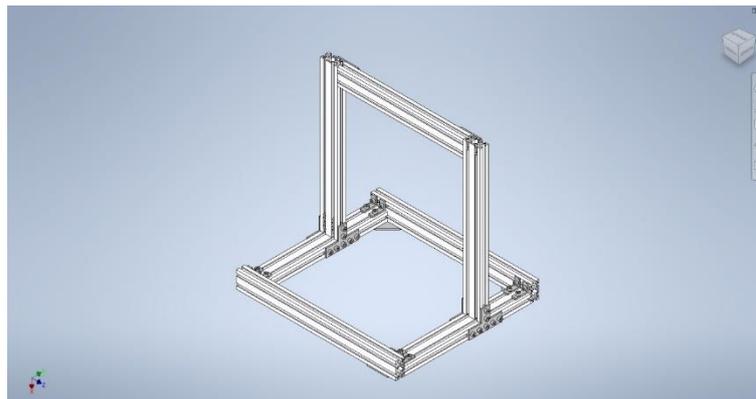


Ilustración 97. Diseño cuadro (Inventor)

Está formado por siete extrusiones de aluminio, cuatro forman la base y tres forman el pórtico. Se han empleado extrusiones de aluminio de 20x40mm del fabricante MISUMI [74].

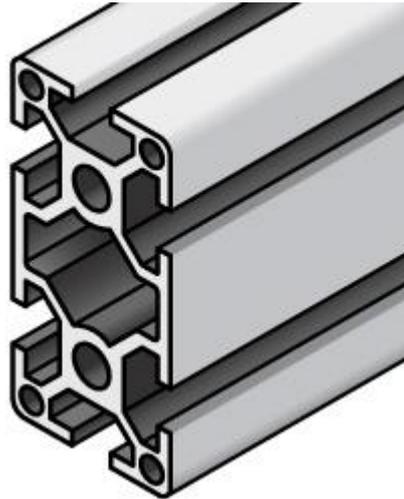


Ilustración 98. Extrusiones de aluminio 2040

Las especificaciones son las siguientes:

- HFS5-2040 380 (x2)
- HFS5-2040 300 (x3)
- HFS5-2040 360 (x2)

Las uniones entre extrusiones se hacen con pletinas y tuercas de inserción[75] y tornillos.

- Tuercas: HNTT5 - 5 (x100)
- Tornillos: M5 x 8mm (x100)

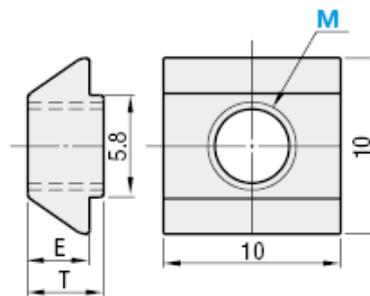


Ilustración 99. Tuercas de inserción

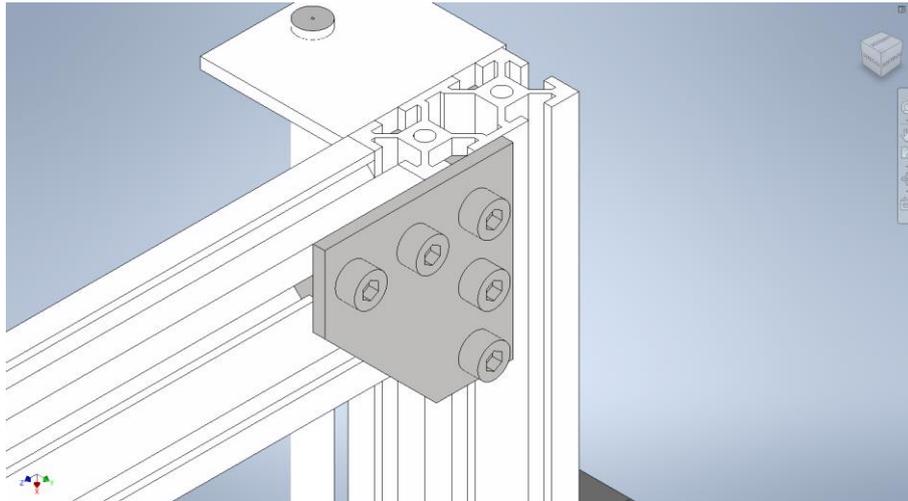


Ilustración 100. Ejemplo de unión.

Otro tipo de unión se hace con abrazaderas angulares[76] (Angle Brackets), las especificaciones son:

- HBLFSNF5 (x4)



Ilustración 101. Ejemplo unión angular.

11. ENSAMBLAJE

11.1. EJE X

El conjunto del eje X conta de cuatro piezas fabricadas por modelado por deposición fundida:

- Soporte Eje X
- Tensor Eje X
- Carro
- Soporte Eje X

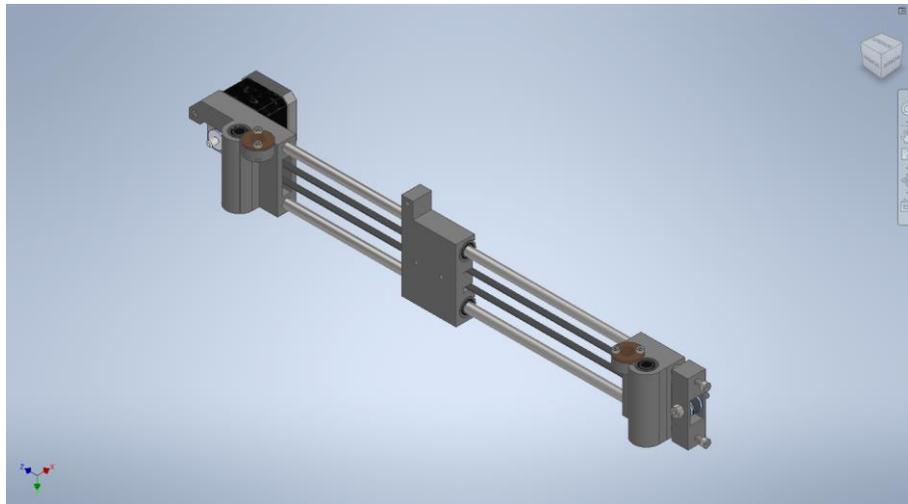


Ilustración 102. Conjunto Eje X.

Las dos piezas laterales están conectadas entre sí por dos varillas. Entre ellas y accionado por el motor y la correa se desplaza el carro. Para tensar la correa existe una pieza la cual tensa la correa a través de dos tornillos (tensor eje x).

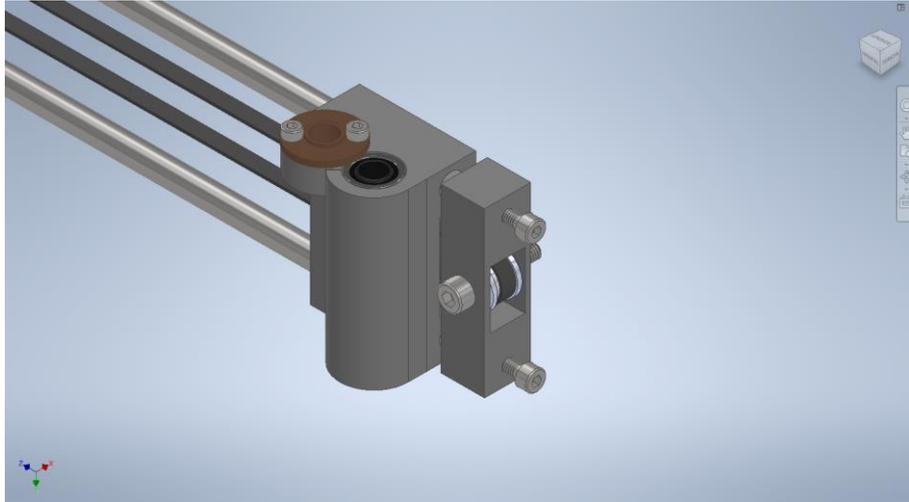


Ilustración 103. Tensor de la correa Eje X.

Este conjunto completo se desplaza a lo largo del eje Z accionado por un motor a través de un husillo.

11.2. EJE Y

- Soporte motor Eje Y
- Idler Eje Y

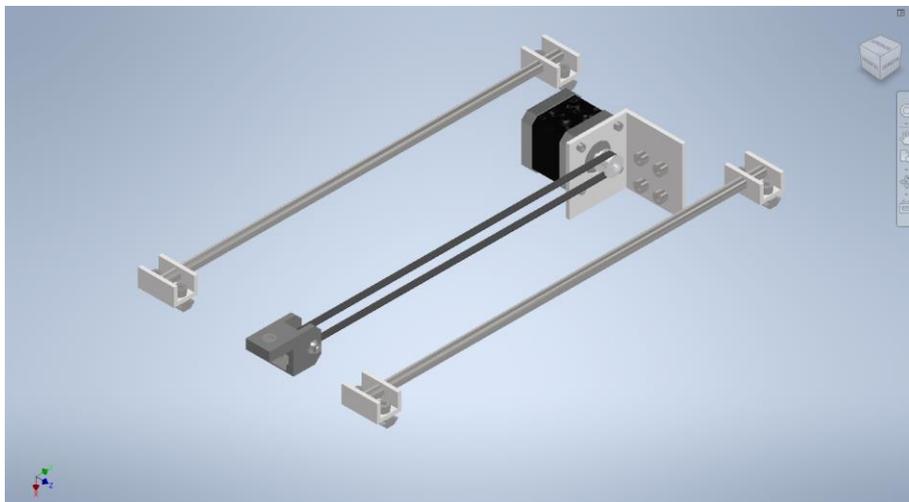


Ilustración 104. Conjunto Eje Y

11.3. EJE Z

Este conjunto desplaza el Eje X. Dispone de dos varillas lisas y dos motores con unos husillos.



Ilustración 105. Conjunto Eje Z

11.4. EXTRUSOR

El extrusor es un elemento comercial que se instala sobre el carro del eje X.

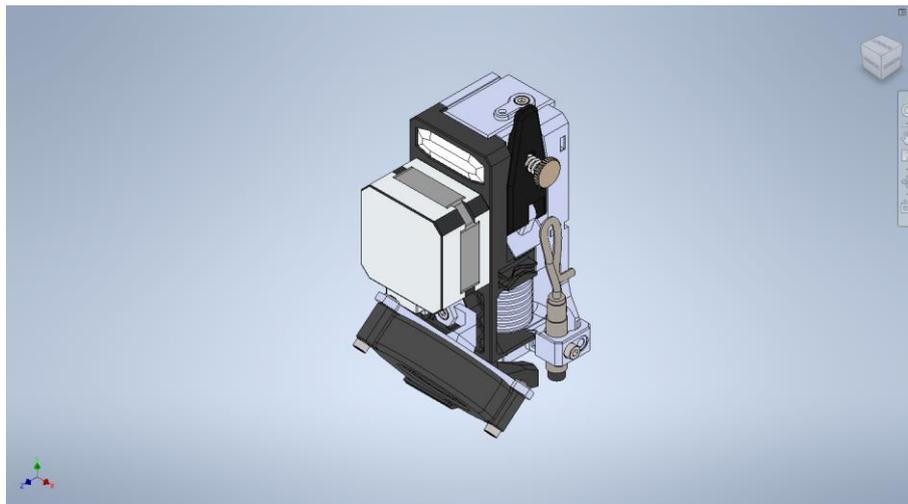


Ilustración 106. Conjunto Extrusor y Fusor.

11.5. CAMA CALIENTE Y SUPERFICIE DE IMPRESIÓN

Este conjunto está formado por tres componentes principales. El primero es el carro XY, a este a través de unos separadores se le atornilla una placa de aluminio (segundo) que hace de base calefactada ya que tiene una cama de silicona adherida (tercero). Sobre esta base calefactada se instalará la superficie de impresión.

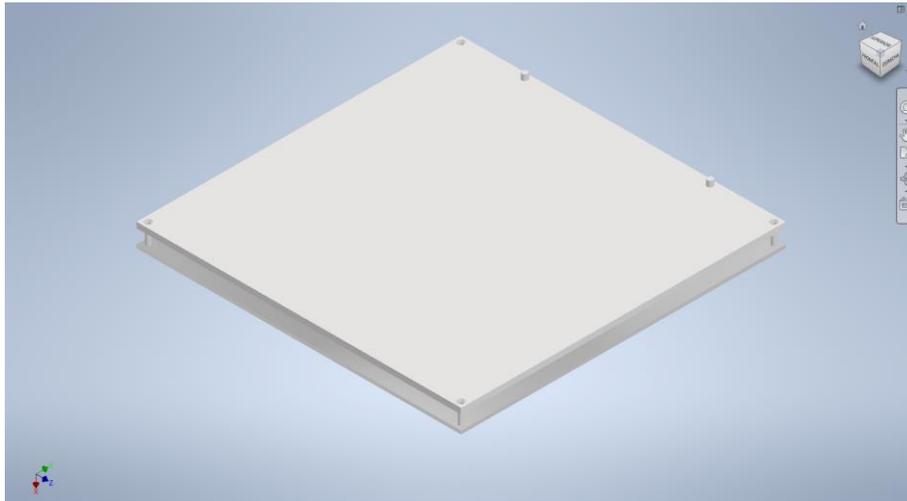


Ilustración 107. Conjunto Cama caliente y superficie de impresión.

La unión de todos estos conjuntos da lugar al montaje completo de la máquina.

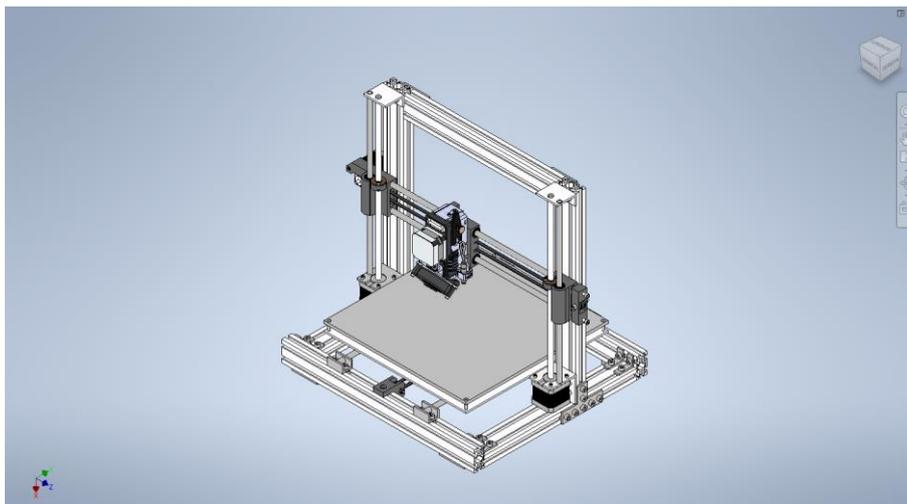


Ilustración 108. Ensamblaje completo de la máquina.

12. FIRMWARE

El siguiente apartado comprende la descarga del firmware, su configuración con los parámetros de la máquina, su compilación y por último una serie de pruebas a realizar como comprobación antes de la puesta en marcha de la máquina.

12.1. DESCARGA

El último lanzamiento estable de Marlin se puede descargar en su página web. Será necesario configurarlo para las características de la impresora. En él, entre otras cosas, encontraremos dos archivos en los que se encuentran las configuraciones:

- Configuration.h
- Configuration_adv.h

Habrá pues que configurar el software para adaptarlo a nuestra placa base, los drivers, sensoreless homing, los componentes y las dimensiones de la máquina.

12.2. CONFIGURACIÓN MARLIN

Esto es un resumen de las modificaciones y ajustes realizados en Marlin, todas las modificaciones completas y detalladas se encuentran en el Anexo.

12.2.1. Configuration.h

En esta sección de Marlin se encuentran las configuraciones básicas, selección de componentes (placa base, extrusor, controladores, termistores), configuración de motores (pasos/mm, velocidades y aceleraciones máximas), temperaturas y elementos necesarios para la calibración de la superficie de impresión.

12.2.2. Configuration_adv.h

Otras configuraciones más avanzadas se encuentran en este archivo, algunas de ellas están relacionadas con el modo de funcionamiento de los controladores (monitorización y debug).

12.3. COMPILACIÓN

Con toda la configuración completada el código está listo para ser compilado y enviado a la tarjeta SD de la placa.

12.4. COMPROBACIÓN

Una vez cargado el firmware en la máquina es importante comprobar que todo funciona correctamente y que no hay problemas de configuración o de montaje.

Para ello con la impresora conectada por USB a un ordenador y mediante Pronterface[77] ejecutaremos una serie de acciones y comandos[78] de G-Code para verificar la impresora:

- Sentido de giro de motores en ejes X, Y y Z: Movimiento en todos los ejes para comprobar que o bien están conectados correctamente o que la lógica configurada es la correcta.
- Termistores y ventiladores: Calentar tanto cama caliente como extrusor para comprobar las lecturas de los termistores y las conexiones. También sirve para comprobar los ventiladores, en concreto el del extrusor, si se activa al llegar a los 50C configurados.
- Sentido de giro del extrusor: Cuando la temperatura es lo suficientemente alta extruir filamento para comprobar el sentido de giro.
- Enviar comando M119 para comprobar el estado de los finales de carrera (open/triggered). Si todo está bien x_min, y_min y z_min deberían estar open y filamento triggered. Para comprobar el de filamento, primero hay que extraerlo y luego volver a ejecutar el comando.
- Enviar comando M502 (y M500 para guardarlos), para cargar la configuración del firmware en la EEPROM entre los que se encuentran.
 - Unidades (mm y C)
 - Pasos por mm
 - Aceleraciones
 - Velocidades
 - Parámetros de la cama caliente, del extrusor
- Enviar comando G28: para ir al 0 de la maquina y comprobar que el sensor de Z funciona y que la sensibilidad del sensorless homing es correcta. M914, el eje y el valor modifica la sensibilidad. Por ejemplo M914 X30 o M914 Y20.

13. CONCLUSIÓN

Se ha profundizado mucho en el análisis de las tecnologías de impresión 3D así como el de sus componentes. El foco de atención en este estudio ha sido el modelado por deposición fundida en el cual he podido adquirir competencias

Se ha desarrollado una maquina funcional que ofrece características y prestaciones equivalentes a las que se pueden encontrar en máquinas comerciales.

La fase de diseño ha sido ha supuesto ciertas complicaciones dado que ha sido necesario el diseño de piezas para su posterior fabricación a través de dos tipos distintos de proceso, impresión 3D y mecanizado.

Durante la realización del proyecto he podido profundizar y ampliar conocimientos en el diseño mecánico y CAD a través de Autodesk Inventor y mejorar mis competencias en el prototipado rápido y en el modelado por deposición fundida.

En futuros trabajos sería interesante materializar el diseño para comprobar si el dimensionamiento y la fabricación han sido adecuados, de esta manera se podría profundizar más la configuración del firmware de la maquina y en el proceso de laminado de piezas.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Sobre Sculpteo y la impresión 3D», *Sculpteo*. <https://www.sculpteo.com/es/about/> (accedido jun. 22, 2020).
- [2] *sulpteo*, «The State of 3D Printing (2020 Edition)». 2020.
- [3] Prusa Research, «Original Prusa i3 MK3 - Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša». <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/> (accedido oct. 25, 2019).
- [4] RepRap, «Prusa i3 - RepRap». https://reprap.org/wiki/Prusa_i3 (accedido dic. 28, 2019).
- [5] Prusa Research, «Prusa Research - Overview», *Crunchbase*. <https://www.crunchbase.com/organization/prusa-research> (accedido dic. 28, 2019).
- [6] Bondtech, «Bondtech - A new dimension of 3D printing», *Bondtech*. <https://www.bondtech.se/en/> (accedido nov. 24, 2019).
- [7] RepRap, «EinsyRambo - RepRap». <https://reprap.org/wiki/EinsyRambo> (accedido dic. 28, 2019).
- [8] Atmel Corporation, «Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V». 2014, Accedido: dic. 28, 2019. [En línea]. Disponible en: www.atmel.com.
- [9] Trinamic, «TMC2130». may 09, 2018, [En línea]. Disponible en: www.trinamic.com.
- [10] Prusa Research, «Original Prusa i3 Multi Material 2.0», *Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša*. <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-multi-material-2-0/> (accedido oct. 25, 2019).
- [11] Prusa Research, «Original Prusa MINI - Prusa3d.com - Open-source 3D printers by Josef Prusa», *Prusa3D - 3D Printers from Josef Průša*. <https://www.prusa3d.com/original-prusa-mini/> (accedido oct. 25, 2019).
- [12] RepRap, «Category:Extruders - RepRap». <https://reprap.org/wiki/Category:Extruders> (accedido nov. 18, 2019).
- [13] Ultimaker, «Ultimaker S5: una impresora industrial que ofrece fiabilidad a gran escala | Ultimaker», *ultimaker.com*. <https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-s5> (accedido oct. 25, 2019).
- [14] A. Dine y G.-C. Vosniakos, «On the development of a robot-operated 3D-printer», *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 6-13, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.004.
- [15] Allegro MicroSystems, LLC, «Allegro MicroSystems». <https://www.allegromicro.com/en> (accedido jun. 10, 2020).
- [16] Texas Instrument, «DRV8825 data sheet, product information and support | TI.com». <https://www.ti.com/product/DRV8825> (accedido jun. 10, 2020).
- [17] W. Palm, «Rapid Prototyping Processes», jul. 30, 2002. <https://web.archive.org/web/20130324132319/http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm#fdm> (accedido nov. 08, 2019).
- [18] J. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, y M. Rombouts, «Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting», *Rapid Prototyp. J.*, vol. 11, n.º 1, pp. 26-36, feb. 2005, doi: 10.1108/13552540510573365.
- [19] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey, y N. Venkata Reddy, «Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, n.º 6, pp. 585-594, may 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004.

- [20] «STL (file format)», *Wikipedia*. dic. 03, 2019, Accedido: dic. 28, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=STL_\(file_format\)&oldid=929073813](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=STL_(file_format)&oldid=929073813).
- [21] «The StL Format | fabbers.com». http://www.fabbers.com/tech/STL_Format (accedido dic. 28, 2019).
- [22] «OBJ File Extension - What is an .obj file and how do I open it?» <https://fileinfo.com/extension/obj> (accedido abr. 04, 2020).
- [23] Sharpened Productions, «AMF File Extension - What is an .amf file and how do I open it?» <https://fileinfo.com/extension/amf> (accedido abr. 04, 2020).
- [24] Sharpened Productions, «3MF File Extension - What is a .3mf file and how do I open it?» <https://fileinfo.com/extension/3mf> (accedido abr. 04, 2020).
- [25] RepRap, «G-code - RepRap». <https://reprap.org/wiki/G-code> (accedido dic. 28, 2019).
- [26] J. Rodrigo, I. Puertas, y C. J. Luis, «Estudio acerca de la tipología de las máquinas medidoras por coordenadas (MMC)», *Interempresas*, nov. 12, 2012. [https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/102185-Estudio-acerca-de-la-tipologia-de-las-maquinas-medidoras-por-coordenadas-\(MMC\).html](https://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/102185-Estudio-acerca-de-la-tipologia-de-las-maquinas-medidoras-por-coordenadas-(MMC).html) (accedido nov. 08, 2019).
- [27] BCN3D Technologies, Inc., «BCN3D Technologies: Impresoras 3D profesionales de escritorio», *BCN3D Technologies*. <https://www.bcn3d.com/es/> (accedido abr. 06, 2020).
- [28] BCN3D Technologies, «The anatomy of an Extrusion System BCN3D Technologies.pdf». 2019, [En línea]. Disponible en: [bcn3dtechnologies.com](http://www.bcn3d.com/es/).
- [29] thinkyhead, «Automatic Bed Leveling», *Marlin Firmware*, sep. 30, 2019. http://marlinfw.org/docs/features/auto_bed_leveling.html (accedido nov. 29, 2019).
- [30] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Cuarta edición. Pearson Educación.
- [31] B.-K. bjarchi thinkyhead, Roxy-3D, «Unified Bed Leveling», *Marlin Firmware*, dic. 02, 2019. http://marlinfw.org/docs/features/unified_bed_leveling.html (accedido dic. 03, 2019).
- [32] R. M. Crowder, *Electric drives and electromechanical systems*, 1st ed. Oxford ; Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [33] Dejan, «How a Stepper Motor Works», *HowToMechatronics*, ago. 08, 2015. <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/stepper-motor/> (accedido nov. 09, 2019).
- [34] S. E. Lyshevski, «Microstepping and high-performance control of permanent-magnet stepper motors», *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 245-253, sep. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.078.
- [35] TECNOPOWER, «HUSILLOS DE ROSCA TRAPEZIAL». [En línea]. Disponible en: www.tecnopower.es.
- [36] «Husillo», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. sep. 04, 2019, Accedido: nov. 14, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Husillo&oldid=118937560>.
- [37] DISAI Automatic Systems, «Acoplamiento flexibles». Accedido: mar. 12, 2020. [En línea]. Disponible en: www.disai.net.
- [38] Gates Mectrol Incorporated, «Timing Belt Theory». jun. 10, 2006.

Bibliografía

- [39] «OpenBuilds "Dream it - Build it - Share it"». <https://openbuilds.com/> (accedido dic. 29, 2019).
- [40] «Kickstarter OpenBuilds V-Slot Aluminum Extrusion», *Kickstarter*. <https://www.kickstarter.com/projects/openrail/openbuilds-v-slot> (accedido dic. 29, 2019).
- [41] «UNE-EN 60751:2008 (Ratificada) Termómetros industriales de res...» <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042493> (accedido feb. 03, 2020).
- [42] Arian S.A., «Pt100, su operación, instalación y tablas.pdf». Accedido: feb. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>.
- [43] jbrazio, «What is Marlin?», *Marlin Firmware*, ene. 01, 2020. <http://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html> (accedido ene. 02, 2020).
- [44] RepRap, «RepRap - RepRap». <https://reprap.org/wiki/RepRap> (accedido dic. 29, 2019).
- [45] RepRap, «List of Firmware - RepRap - Sprinter». https://reprap.org/wiki/List_of_Firmware#Sprinter (accedido dic. 29, 2019).
- [46] RepRap, «List of Firmware - RepRap - Grbl». https://reprap.org/wiki/List_of_Firmware#Grbl (accedido dic. 29, 2019).
- [47] Prusa Research, «prusa3d/PrusaSlicer», *GitHub*. <https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer> (accedido abr. 04, 2020).
- [48] Simplify3D, «Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software». / (accedido abr. 04, 2020).
- [49] Ultimaker, «Ultimaker Cura: software de impresión 3D potente y fácil de usar | Ultimaker», *ultimaker.com*. <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura> (accedido abr. 04, 2020).
- [50] Slic3r, «Slic3r Manual - Welcome to the Slic3r Manual». <https://manual.slic3r.org/> (accedido nov. 25, 2019).
- [51] Slic3r, «slic3r/Slic3r», *GitHub*. <https://github.com/slic3r/Slic3r> (accedido nov. 25, 2019).
- [52] O. Stříteský, J. Průša, y M. Bach, «Basics of 3D printing». Prusa Research a.s.
- [53] O. Martin y L. Avérous, «Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems», *Polymer*, vol. 42, n.º 14, pp. 6209-6219, jun. 2001, doi: 10.1016/S0032-3861(01)00086-6.
- [54] Prusa Research, «Manual de impresión. Manual de impresión para impresoras 3D: Original Prusa i3 MK3S». sep. 20, 2019.
- [55] QuimiNet.com, «Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones | QuimiNet.com». <https://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm> (accedido nov. 27, 2019).
- [56] C.-T. Yu *et al.*, «Fabrication of thermoplastic polyurethane (TPU) / thermoplastic amide elastomer (TPAE) composite foams with supercritical carbon dioxide and their mechanical properties», *J. Manuf. Process.*, vol. 48, pp. 127-136, dic. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.09.022.
- [57] G. Sodeifian, S. Ghaseminejad, y A. A. Yousefi, «Preparation of polypropylene/short glass fiber composite as Fused Deposition Modeling (FDM) filament», *Results Phys.*, vol. 12, pp. 205-222, mar. 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2018.11.065.

- [58] MISUMI Corporation, «MISUMI - Industrial Configurable Components Supply». <https://us.misumi-ec.com/> (accedido jun. 11, 2020).
- [59] MISUMI Corporation, «MISUMI - Rotary Shafts». 2019, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_0854_001.pdf.
- [60] MISUMI Corporation, «MISUMI - Lead Screws». 2019, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_0832.pdf.
- [61] Trinamic, «StallGuard», *Trinamic*, nov. 03, 2016. <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/stallguard/> (accedido jun. 10, 2020).
- [62] Trinamic, «TMC2209 Datasheet». may 18, 2018.
- [63] FYSETC Co,Ltd, «Silent2209 - FYSETC WIKI». <https://wiki.fysetc.com/Silent2209/> (accedido jun. 06, 2020).
- [64] Trinamic, «Application Note - CoolStep». Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/>.
- [65] Trinamic, «Application Note - spreadCycle». Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/>.
- [66] Trinamic, «Application Note - StealthChop». Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/>.
- [67] Trinamic, «Application Note - DcStep». Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.trinamic.com/technology/adv-technologies/>.
- [68] BigTreeTech, «GitHub BigTreeTech - BTT SKR V1.4», jun. 06, 2020. <https://github.com/bigtreetech/BIGTREETECH-SKR-V1.3> (accedido jun. 06, 2020).
- [69] Shenzhen Big Tree Technology CO. LTD., «SKR V1.4 - Product Display». .
- [70] Shenzhen Big Tree Technology CO. LTD., «SKR V1.4 - Motherboard Operating instruction». oct. 30, 2019, Accedido: jun. 06, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/bigtreetech/BIGTREETECH-SKR-V1.3/blob/master/BTT%20SKR%20V1.4/BTT%20SKR%20V1.4%20Instruction%20Manual.pdf>.
- [71] Rascom Computerdistribution Ges.m.b.H., «Noctua NF-A4x10 FLX - FAN Specification». Accedido: ene. 20, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://noctua.at/en/nf-a4x10-flx/specification>.
- [72] «LDO Motors». <http://ldomotors.com/> (accedido jun. 11, 2020).
- [73] Stefan Hermann, «Prusa i3 MK2 - Practical Vibration Analysis». Accedido: jun. 11, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Ws1JfHI3Y0o>.
- [74] MISUMI Corporation, «MISUMI - Aluminum Extrusion». 2019, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_2686.pdf.
- [75] MISUMI Corporation, «MISUMI - Pre-Assembly Insertion Short Nuts -For HFS5 Series Aluminum Extrusions». 2019, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_2710.pdf.
- [76] MISUMI Corporation, «MISUMI - Angle Brackets». 2019, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en: https://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2019/2019_US_2692.pdf.



Bibliografía

- [77] Printron, «Printron: Pure Python 3d printing host software». <https://www.pronterface.com/> (accedido jun. 06, 2020).
- [78] J. Thornton, «LinuxCNC G code Reference». <https://gnipsel.com/linuxcnc/reference/index.html> (accedido jun. 10, 2020).



Relación de documentos

| | | |
|---|-----|---------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Memoria | 105 | páginas |
| <input type="checkbox"/> Anexos | NN | páginas |

Zaragoza, a 23 de 06 de 2020

Firmado: Luis Bueno Sáinz

